

Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Industrial
Curso 2010/2011

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE ORIFICIOS Y SU INFLUENCIA SOBRE INESTABILIDADES TERMO-ACÚSTICAS EN LLAMAS

Autor: Fernando Leonardo Tejero Embuena

Director: Ricardo Hernández Arrondo

Ponente: Javier Ballester Castañer

Laboratorio de Combustión Industrial (LCI)

Área de Mecánica de Fluidos. Departamento de Ciencia y
Tecnología de Materiales y Fluidos

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

Zaragoza, Septiembre 2011



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Javier Ballester la confianza depositada en mí en estos últimos meses y su implicación en este proyecto desde el principio. Este proyecto no podría haber salido adelante sin él ni Ricardo Hernández, director del proyecto, y del que he aprendido innumerables cosas en temas de investigación.

También quiero dar las gracias a todos y cada uno de mis compañeros del LITEC ya que han contribuido a que el ambiente de trabajo fuera estupendo durante todo este tiempo, así como al personal técnico del laboratorio por su amabilidad y predisposición para ayudarme en cualquier momento.

En estos momentos tampoco olvido a mis amigos de toda la vida que siempre me han dado ánimos y a los que he hecho durante mi etapa en la universidad ya que han contribuido a que nunca olvide estos años.

Por último, quiero agradecer todo el apoyo y confianza que he recibido de mis padres, Fernando y Pilar, ya que sin ellos sería imposible que estuviera escribiendo estas líneas.

Por todo esto, GRACIAS a todos.

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ACÚSTICO DE ORIFICIOS Y SU INFLUENCIA SOBRE INESTABILIDADES TERMO-ACÚSTICAS EN LLAMAS

RESUMEN

Los fenómenos de inestabilidades termo-acústicas consisten en la realimentación positiva entre fluctuaciones acústicas y el proceso de combustión, dando lugar a oscilaciones que se amplifican rápidamente. En algunos casos el resultado es la aparición de fuertes pulsaciones de presión en cámaras de combustión, con graves consecuencias para el equipo. Los grandes fabricantes de turbinas de gas están dedicando un notable esfuerzo tecnológico para evitar su aparición, mucho más probable en combustores de premezcla pobre, una tecnología cada vez más común en las plantas de generación de energía (ciclos combinados) o en aplicaciones con combustibles alternativos (gases enriquecidos en H₂, gases derivados de biomasa...). Un primer paso para encontrar soluciones es la comprensión de estos fenómenos, que todavía es incompleta a pesar del enorme esfuerzo investigador que vienen dedicando grupos de investigación en todo el mundo.

Algo constatado es que según la condición de contorno (impedancia acústica) de la instalación, los rangos de inestabilidades termo-acústicas se modifican notablemente, motivo por el cual se hace necesario imponer estas condiciones correctamente. El grueso principal del proyecto se basa en utilizar la técnica de los dos micrófonos para medir impedancias acústicas y caracterizar este estudio a impedancias de orificios, de las cuales no se ha encontrado bibliografía que definiera su comportamiento acústico.

El primer paso para este cometido será la medición de diferentes impedancias según esta técnica y su comparación con expresiones teóricas para la validación del procedimiento de medida.

Una vez corroborado que el método de medida es el correcto se procederá a la medición de impedancias acústicas de diferentes orificios para distintas condiciones de caudal, con el objetivo de tenerlos totalmente caracterizados. Para comprobar que las medidas de estas impedancias son correctas, se compararán las fluctuaciones de presión experimentales con las obtenidas computacionalmente mediante un modelo acústico.

Con el estudio acústico de los orificios finalizado, se procederá a la utilización de estos datos como condición de contorno en un modelo termo-acústico que prediga los rangos de inestabilidad termo-acústica de una instalación. Para dar validez al modelo, se compararán las medidas experimentales realizadas en un combustor de premezcla con los resultados computacionales obtenidos con el modelo, y posteriormente se procederá a estudiar la influencia que tienen los orificios en los rangos de inestabilidad de la instalación.

Por último, junto a las principales conclusiones extraídas del proyecto, se enumeran una serie de posibilidades de ampliación del trabajo realizado y que se proponen como trabajo futuro.

ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos y trabajos previos	1
1.3 Contenido del trabajo	2
2. Antecedentes impedancias acústicas	5
2.1 Impedancia de salida	5
2.2 Impedancia de entrada	6
3. Expresiones teóricas de la acústica	7
3.1 Ecuaciones generales	7
3.2 Ecuación de ondas. Impedancia acústica teórica	8
3.3 Método de los dos micrófonos. Impedancia acústica experimental	9
4. Descripción de la instalación	10
4.1 Características generales	10
4.2 Procedimiento experimental	11
4.3 Calibración de los micrófonos	12
5. Proceso de montaje de la instalación	14
6. Medida de impedancias acústicas	17
6.1 Comparación medidas teóricas y experimentales sin flujo	17
6.2 Comparación medidas teóricas y experimentales con flujo	20
7. Medida de impedancias acústicas de orificios	22
7.1 Medida de impedancia acústica de orificios de salida	22
7.2 Medida de impedancia acústica de orificios de entrada	23
7.3 Resolución del sistema acústico completo	25
8. Modelo termo-acústico	27
9. Conclusiones	36

Anexos.....	40
Anexo A. Ecuaciones de la acústica lineal.....	41
Anexo B. Ecuación de ondas	44
Anexo C. Ecuaciones del método de los dos micrófonos.....	45
Anexo D. Modelo acústico unidimensional.....	48
Anexo E. Impedancia acústica a lo largo del espacio	52
Anexo F. Resultados medidas impedancias de orificios.....	54
Anexo G. Criterio de Rayleigh.....	61
Anexo H. Instrumentación	62
Anexo I. Características técnicas de la instrumentación.....	65
Anexo J. Fotografías de la instalación	67

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1 Impedancia de descarga	5
Figura 2.2 Impedancia de entrada	6
Figura 4.1 Esquema de la instalación.....	10
Figura 4.2 Banco de ensayos.....	11
Figura 4.3 Esquema proceso de calibración	12
Figura 4.4 Factor de calibración de los micrófonos en amplitud y fase	13
Figura 5.1 Esquema de la Configuración 2 para medir impedancias de salida.....	14
Figura 5.2 Esquema de la Configuración 2 para medir impedancias de entrada	14
Figura 5.3 PSD para $Q=11 \text{ m}^3/\text{h}$. 0 vs 5 mayas	16
Figura 5.4 Comparación fluctuación presión Configuración 1 y 2	16
Figura 6.1 Comparación medida experimental Z0 con expresión teórica sin flujo en configuración 1 y 2	17
Figura 6.2 Comparación medida experimental y expresión teórica a lo largo del tubo sin flujo18	
Figura 6.3 Comparación fluctuaciones de presión sin flujo	19
Figura 6.4 Comparación medida experimental Z0 con expresión teórica con flujo en configuración 1 y 2	20
Figura 6.5 Comparación fluctuaciones de presión con flujo.....	21
Figura 7.1 Comparación impedancia orificio de salida con diferentes longitudes de tubo	22
Figura 7.2 Impedancia orificio de salida $M=0.015$	23
Figura 7.3 Comparación impedancia orificio de entrada con diferentes longitudes de tubo	24
Figura 7.4 Impedancia orificio de entrada $M=0.015$	24
Figura 7.5 Modelo acústico para instalación propuesta.....	25
Figura 7.6 Comparación del cociente de fluctuación de presión experimental y según modelo acústico	26
Figura 8.1 Turbina de gas, Figura esquemática y Modelo termo-acústico.....	28
Figura 8.2 Resultados experimentales y según modelo termo-acústico	30
Figura 8.3 Influencia en las frecuencias de la instalación al modificar orificios	35

Figura C.1 Esquema instalación método dos micrófonos.....	45
Figura F.1 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0$	54
Figura F.2 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.015$	55
Figura F.3 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.025$	55
Figura F.4 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.037$	56
Figura F.5 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.05$	56
Figura F.6 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.07$	57
Figura F.7 Módulo y fase impedancia orificio de salida $M=0.1$	57
Figura F.8 Módulo y fase impedancia orificio de entrada $M=0$	58
Figura F.9 Módulo y fase impedancia orificio de entrada $M=0.015$	58
Figura F.10 Módulo y fase impedancia orificio de entrada $M=0.025$	59
Figura F.11 Módulo y fase impedancia orificio de entrada $M=0.037$	59
Figura F.12 Módulo y fase impedancia orificio de entrada $M=0.05$	60
Figura H.1 Esquema altavoz.....	62
Figura H.2 Esquema micrófonos	63
Figura I.1 Cuadro de calibración del micrófono 4188.....	65
Figura I.2 Rango de operación del micrófono 4188.....	65
Figura I.3 Cabezal micrófono 4188	65
Figura I.4 Características fuente alimentación WB-1372	66
Figura I.5 Especificaciones técnicas DAQ 1200 Family	66
Figura J.1 Configuración medición impedancias de salida	67
Figura J.2 Detalle cámara anecóica y altavoz.....	67
Figura J.3 Posición altavoz para medida de impedancias de entrada	68
Figura J.4 Detalle de la entrada de la instalación cuando se miden impedancias de entrada ...	68
Tabla 5.1 PSD para diferente número de mallas y caudales.....	15
Tabla 6.1 Comparación resultados sin flujo.....	17
Tabla 6.2 Comparación resultados con flujo	20
Tabla 8.1 Modelo termo-acústico según FTF.....	32

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

En una sociedad con una mayor concienciación ambiental y un marco normativo que impone restricciones en las emisiones de contaminantes a la atmósfera, se hace necesario que en las turbinas de gas se implanten medidas de reducción de emisiones de NO_x, causante, entre otros, de la destrucción de la capa de ozono y de lluvia ácida. La tecnología que se está imponiendo en este campo es la combustión de premezcla pobre (lean premixed combustión, LPC), evitando las altas temperaturas de llama que dan lugar a altas concentraciones de NO_x [17-18].

En las llamas de premezcla pobre se utilizan altos excesos de aire, lo que hace reducir significativamente la temperatura de llama respecto a los quemadores convencionales de difusión donde la combustión se produce en puntos donde la mezcla es estequiométrica. El problema que plantean estos sistemas es su alta tendencia a la aparición de inestabilidades de combustión [6] debido a fenómenos termo-acústicos.

Estas inestabilidades se deben al acoplamiento entre fluctuaciones de calor y presión en la cámara de combustión, en determinadas ocasiones este acoplamiento se amplifica rápidamente. Además del riesgo que supone para la instalación, este fenómeno limita el exceso de aire que puede utilizarse y por tanto el nivel de reducción de emisiones de NO_x.

El Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LITEC) en colaboración con otros centros de investigación europeos está estudiando los fenómenos de inestabilidades termo-acústicas bajo el proyecto LIMOUSINE (Limit Cycles of Thermo-Acoustic Oscillations in Gas Turbines).

1.2 OBJETIVOS Y TRABAJOS PREVIOS

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo y utilización de una técnica para el cálculo de impedancias acústicas, y su posterior implementación en modelos termo-acústicos que serán utilizados en la predicción de rangos de inestabilidad de una instalación.

Para la obtención de estas impedancias se utilizará el método de los dos micrófonos según el procedimiento propuesto por Seybert y Ross [1], basado en la medida de la fluctuación de presión en dos puntos de una instalación.

Las diferentes etapas que se fijaron para la realización del proyecto fueron:

- Revisión bibliográfica de fenómenos acústicos y su influencia en las inestabilidades de combustores de turbinas de gas.
- Definición y puesta a punto del método experimental para realizar medidas de impedancias acústicas. Estudio de la instalación, definición de matriz de ensayos y adaptación para disponer nueva instrumentación para este cometido.

- Realización de ensayos. Registro y análisis de fluctuaciones de presión.
- Uso del programa informático Matlab para desarrollar los diferentes algoritmos de procesamiento de los datos recogidos en los ensayos y su utilización para el cálculo de impedancias de orificios.
- La aplicación práctica de las medidas de impedancias acústicas será su utilización en un modelo termo-acústico. Análisis del modelo existente y adaptación para la configuración de estudio, un combustor de premezcla.
- Predicción de rangos de inestabilidad y frecuencias características en función de las condiciones de operación del combustor.

Durante el presente proyecto se tratará de caracterizar el comportamiento acústico de orificios, dado que pueden jugar un papel determinante en el comportamiento termo-acústico del combustor. En la bibliografía consultada existen expresiones para casos de orificios sin flujo medio o para altas velocidades (bloque sónico), pero no se ha encontrado información para los casos de interés de este trabajo, con números de Mach apreciables pero menores que la unidad. Para evaluar la influencia de las propiedades acústicas de los orificios, se utilizará un modelo termo-acústico desarrollado por el grupo de trabajo del LCI (Laboratorio de Combustión Industrial) y se adaptará para las condiciones de la instalación de estudio. Un modelo termo-acústico consiste en la simulación computacional de un sistema real gracias al cual se pueden calcular numerosos parámetros de interés, por ejemplo, la fluctuación de presión en cualquier punto de una instalación o las frecuencias que hacen que aparezcan inestabilidades en el sistema.

1.3 CONTENIDO DEL TRABAJO

La memoria del proyecto se estructura en los siguientes capítulos y cuyo contenido se resume brevemente:

- **Capítulo 1. Introducción:** Se enmarca la problemática existente en las turbinas de gas y se detallan los objetivos propuestos del PFC para el estudio de los fenómenos que envuelven estos problemas.
- **Capítulo 2. Antecedentes Impedancias Acústicas:** A lo largo del capítulo se realiza una introducción al lector a las impedancias acústicas.
- **Capítulo 3. Expresiones Teóricas de la Acústica:** En este capítulo se detallan todas las expresiones empleadas en los cálculos realizados a lo largo del proyecto.
- **Capítulo 4. Descripción de la Instalación:** Se explica la instalación con la que se realizan los ensayos para la medición de impedancias acústicas, así como el procedimiento seguido para este cometido y el proceso llevado para la calibración de los micrófonos de medida.

- **Capítulo 5. Proceso de Montaje de la Instalación:** Debido a las limitaciones existentes en la instalación inicial, durante el capítulo se explican las modificaciones realizadas en la instalación así como las ventajas derivadas de estos cambios.
- **Capítulo 6. Medida de Impedancias Acústicas:** A lo largo del capítulo se realizarán algunas medidas experimentales de impedancias acústicas y se compararán los resultados con expresiones teóricas.
- **Capítulo 7. Medida de Impedancias Acústicas de Orificios:** Una vez que se haya comprobado con el Capítulo 6 que el procedimiento experimental de medidas de impedancias acústicas es correcto se procederá a la medición de impedancias de orificios, grueso principal del proyecto.
- **Capítulo 8. Modelo Termo-Acústico:** En este capítulo se utiliza un modelo termo-acústico. Primeramente se valida comparando resultados computacionales con medidas experimentales en un combustor de premezcla, para posteriormente estudiar la influencia de los orificios en la descarga de la turbina.
- **Capítulo 9. Conclusiones:** Se realizan una serie de reflexiones acerca de las aportaciones del proyecto. También se incluyen posibilidades de ampliación del trabajo realizado.

Además de los diferentes capítulos que forman parte de la memoria del proyecto, existen una serie de anexos que amplían el trabajo realizado:

- **Anexo A. Ecuaciones de la acústica lineal:** Se realiza el desarrollo matemático de las diferentes expresiones que aparecen en el Capítulo 3.
- **Anexo B. Ecuación de ondas:** En este anexo se detalla los pasos para la obtención de la ecuación de ondas, ecuación principal de la acústica.
- **Anexo C. Ecuaciones del método de los dos micrófonos:** Se explican las diferentes expresiones utilizadas en el cálculo experimental de impedancias acústicas.
- **Anexo D. Modelo acústico unidimensional:** A lo largo del anexo se detallan la herramienta matemática de los invariantes de Riemann así como su aplicación para la utilización en modelos termo-acústicos.
- **Anexo E. Impedancia acústica a lo largo del espacio:** Se recoge la formulación matemática empleada en algunos cálculos del Capítulo 6.
- **Anexo F. Resultados medidas impedancias de orificios:** A lo largo del anexo se muestran diferentes gráficas de todas las medidas experimentales de orificios realizadas a lo largo del proyecto.
- **Anexo G. Criterio de Rayleigh:** Se recoge la explicación teórica del motivo de la aparición de inestabilidades termo-acústicas.

- **Anexo H. Instrumentación:** En este anexo se realiza la explicación del principio de funcionamiento de los diferentes instrumentos de medida empleados en los ensayos experimentales.
- **Anexo I. Características técnicas de la instrumentación:** Se muestran las diferentes fichas técnicas de las características de los elementos de medida empleados en los ensayos.
- **Anexo J. Fotografías de la instalación:** Se recogen diferentes fotografías de la instalación propuesta en sus dos configuraciones posibles.

2. ANTECEDENTES IMPEDANCIAS ACÚSTICAS

Impedancia acústica se define como el cociente entre la fluctuación de presión, p' , y la fluctuación de velocidad, u' , que hay en un punto. Es de vital importancia caracterizarlas ya que según las condiciones de entrada/salida de un sistema éstas cambian y los rangos de inestabilidades termo-acústicas también, tal y como se comprobará en el Capítulo 8. Se pueden hacer dos distinciones: impedancias de salida y de entrada. Las primeras caracterizan todo lo que hay aguas abajo de una instalación mientras que las segundas lo que se encuentra aguas arriba de la misma.

2.1 IMPEDANCIA DE SALIDA

El caso más sencillo se trata de un conducto que descarga directamente a la atmósfera, M.L Munjal [2] obtuvo una expresión teórica de esta impedancia, Z_0 .

La expresión propuesta en [2] para la impedancia de la salida de un tubo con flujo medio es:

$$\frac{Z_0}{\rho c} = \frac{k^2 r^2}{4} - M(1 + k^2 l_e^2) + i k l_e \quad (2.1)$$

Siendo:

$$k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \equiv n^\circ \text{ de onda}$$

$$\omega \equiv \text{Frecuencia angular}$$

$$f \equiv \text{Frecuencia de onda}$$

$$M = \frac{u}{c} \equiv n^\circ \text{ de Mach}$$

$$c \equiv \text{Velocidad del sonido}$$

$$u \equiv \text{Velocidad del flujo medio}$$

$$\rho \equiv \text{Densidad media del fluido}$$

$$r \equiv \text{Radio del tubo de la instalación}$$

$$l_e \equiv \text{Longitud de corrección de Helmholtz } (l_e = 0.6133 \cdot r)$$

Con esta expresión se puede calcular la impedancia acústica de descarga, tanto cuando no circula caudal por la instalación ($M=0$) como cuando existe flujo medio.

En la Figura 2.1(a) se representa un esquema de esta impedancia.

Cuando en la salida de la instalación se coloca un orificio se tiene una condición de contorno diferente al caso anterior, es decir, la impedancia acústica se modifica. Un esquema de la impedancia cuando existe un orificio en la descarga se muestra en la Figura 2.1(b):

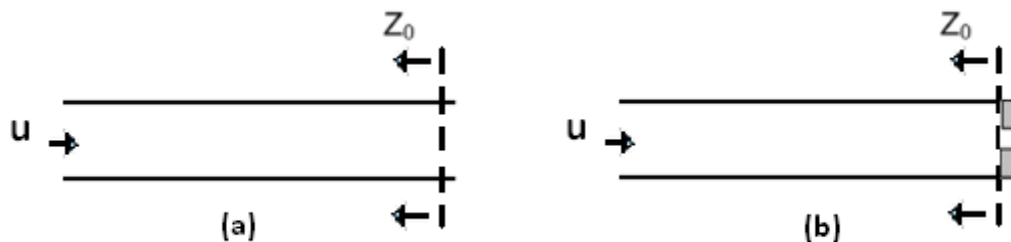


Figura 2.1 Impedancia de descarga

Si el flujo que circula por la instalación es tan alto que se alcanzan condiciones de bloqueo sónico en el orificio ($M_{orificio}=1$), utilizando expresiones de fluidodinámica [7] se pueden calcular las diferentes propiedades aguas arriba del orificio. En este caso, la impedancia acústica es conocida:

$$Z_{orificio\ bloqueado} = \frac{2}{(\gamma - 1)M} \quad (2.2)$$

Pero, ¿Qué ocurre si se tiene un orificio a la salida de la instalación pero las condiciones son diferentes a las de bloqueo?

⇒ En ese caso no existe ninguna expresión teórica que permita caracterizar la impedancia del orificio. Durante este proyecto se tratará de calcular diferentes impedancias de orificios realizando las comprobaciones oportunas para poder confirmar que se están midiendo correctamente.

2.2 IMPEDANCIA DE ENTRADA

En caso de geometrías sencillas, por ejemplo un tubo como en las figuras anteriores, las expresiones para caracterizar las diferentes impedancias acústicas según la condición de contorno son idénticas a las del apartado anterior. En el caso de querer caracterizar la impedancia de entrada de una instalación más compleja, como puede ser una turbina de gas, no existen expresiones teóricas que modelizen estas impedancias por lo que se hace estrictamente necesario medirlas de manera experimental.

En la Figura 2.2 (a) se representa la impedancia de entrada para un tubo cuando no hay ningún orificio, mientras que en la Figura 2.2 (b) se muestra la misma impedancia cuando sí que lo hay.

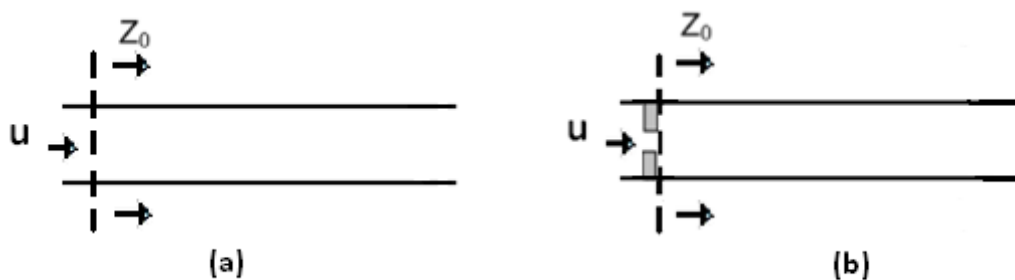


Figura 2.2 Impedancia de entrada

3. EXPRESIONES TEÓRICAS DE LA ACÚSTICA

A continuación se hace un breve repaso de las ecuaciones que se utilizarán para el cálculo de impedancias acústicas.

3.1 ECUACIONES GENERALES

Las diferentes ecuaciones que describen el comportamiento de un fluido [8] son:

$$\text{Conservación de la masa:} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.1)$$

$$\text{Conservación de la cantidad de movimiento:} \quad \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \nabla) \vec{u} = -\nabla p \quad (3.2)$$

$$\text{Conservación de la energía:} \quad \rho \frac{\partial e}{\partial t} + \rho(\vec{u} \nabla) e = -p(\nabla \vec{u}) \quad (3.3)$$

$$\text{Ecuación de los gases ideales:} \quad p = \rho R T \quad (3.4)$$

El estado de equilibrio de un fluido está definido por los valores de presión, densidad y velocidad (p_0, \vec{u}_0, ρ). En el momento en que existe alguna perturbación cada variable citada anteriormente se puede descomponer en una componente de valor medio y en otra fluctuante:

$$p = p_0 + p' \quad (3.5)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho' \quad (3.6)$$

$$\vec{u} = \vec{u}_0 + \vec{u}' \quad (3.7)$$

En las que p', ρ', \vec{u}' representan las diferentes fluctuaciones que pueden aparecer.

Suposiciones realizadas:

- Gas ideal, no viscoso.
- Los procesos de compresión y expansión del gas en la propagación de las ondas sonoras suceden de manera adiabática, lo que implica que la entropía permanece constante.
- El campo acústico es unidimensional.
- Se desprecian términos de orden 2 y superiores (aproximación lineal acústica).

Con estas suposiciones y sustituyendo (3.5), (3.6), (3.7) en (3.1)-(3.4), obtenemos las siguientes ecuaciones (el desarrollo matemático se detalla en el Anexo A):

$$\frac{\partial \rho'}{\partial t} = \vec{u}_0 \frac{\partial \rho'}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial \vec{u}'}{\partial x} = 0 \quad (3.8)$$

$$\rho_0 \frac{\partial u'}{\partial t} + \vec{u}_0 \rho_0 \frac{\partial \vec{u}'}{\partial x} = -\frac{\partial \rho'}{\partial x} \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \vec{u}_0 \frac{\partial \rho'}{\partial x} \right) = \frac{1}{\gamma p_0} \left(\frac{\partial \rho'}{\partial t} + \vec{u}_0 \frac{\partial \rho'}{\partial x} \right) \quad (3.10)$$

3.2 ECUACIÓN DE ONDAS. IMPEDANCIA ACÚSTICA TEÓRICA [3]:

Combinando las ecuaciones anteriores se puede obtener la ecuación de ondas (Anexo B).

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} p' = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_0 \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 p' \quad (3.11)$$

La solución de la ecuación de ondas se puede expresar en términos de ondas que viajan en sentidos opuestos, una onda incidente y otra reflejada.

$$p'(x, t) = p_i(x, t) + p_r(x, t) = \left(D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} + D^- e^{\frac{ikx}{1-M}} \right) e^{i\omega t} \quad (3.12)$$

Combinando la anterior ecuación con la ecuación de cantidad de movimiento, se puede obtener la expresión teórica de fluctuación de velocidad.

$$u'(x, t) = \frac{1}{\rho c} \left(D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} - D^- e^{\frac{ikx}{1-M}} \right) e^{i\omega t} \quad (3.13)$$

Y por definición, la impedancia acústica (Z) es el cociente entre la fluctuación de presión y de velocidad:

$$Z = \frac{p'}{u'} = \rho c \frac{D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} + D^- e^{\frac{ikx}{1-M}}}{D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} - D^- e^{\frac{ikx}{1-M}}} \Rightarrow \frac{Z}{\rho c} = \frac{D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} + D^- e^{\frac{ikx}{1-M}}}{D^+ e^{\frac{-ikx}{1+M}} - D^- e^{\frac{ikx}{1-M}}} \quad (3.14)$$

Siendo:

D^+ ; $D^- \equiv$ Amplitud de la onda incidente y reflejada respectivamente

El resto de variables siguen la misma notación que en el Apartado 2.1

Los valores de las dos amplitudes (D^+ y D^-) se obtienen imponiendo dos condiciones de contorno tal y como se verá más adelante.

3.3 MÉTODO DE LOS DOS MICRÓFONOS. IMPEDANCIA ACÚSTICA EXPERIMENTAL

El método utilizado para la determinación de las impedancias ha sido el método de los dos micrófonos propuestos por Seybert y Ross (*Anexo C*).

La idea fundamental de este método consiste en medir la fluctuación de presión que hay en dos puntos distintos de una instalación y utilizando las diferentes expresiones que se enumeran en el anexo anterior obtener las diferentes fórmulas para el cálculo de la impedancia acústica.

Así pues, la Z experimental se puede expresar según 3.15:

$$\frac{\hat{Z}_n(f)}{\rho c} = \frac{\hat{S}_{AA}(f) - \hat{S}_{BB}(f) - i2\hat{Q}_{AB}(f)}{\hat{S}_{AA}(f) + \hat{S}_{BB}(f) - 2\hat{C}_{AB}(f)} \quad (3.15)$$

Donde \hat{S}_{ii} hace referencia a la densidad espectral y \hat{C}_{ij} y \hat{Q}_{ij} a la densidad espectral cruzada y cuyos valores se obtienen al resolver un sistema donde las variables son la transformada de Fourier [16] de los diferentes datos obtenidos por los micros.

Dividiendo la impedancia en dos términos (parte real e imaginaria):

$$\hat{Z}_n(f) = \hat{R}_n(f) + i\hat{X}_n(f) \quad (3.16)$$

$$\frac{\hat{R}_n(f)}{\rho c} = \frac{\hat{S}_{AA}(f) - \hat{S}_{BB}(f)}{\hat{S}_{AA}(f) + \hat{S}_{BB}(f) - 2\hat{C}_{AB}(f)} \quad (3.17)$$

$$\frac{\hat{X}_n(f)}{\rho c} = \frac{-i2\hat{Q}_{AB}(f)}{\hat{S}_{AA}(f) + \hat{S}_{BB}(f) - 2\hat{C}_{AB}(f)} \quad (3.18)$$

Una forma de justificar que a partir de dos medidas de presión se puede calcular la impedancia acústica es la siguiente [23]:

Partiendo de la ecuación que relaciona la velocidad fluctuante con el gradiente de presión y el flujo medio:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}'}{\partial t} = \frac{\vec{u}_0}{c^2} \frac{\partial p'}{\partial t} + \frac{\partial p'}{\partial x} \left(\frac{\vec{u}_0^2}{c^2} - 1 \right) \quad (3.19)$$

Y haciendo la transformada de la ecuación diferencial anterior se obtiene:

$$U' = \frac{u_0}{\rho_0 c^2} P' + \frac{1}{\rho_0 i \omega} \left(\frac{u_0^2}{c^2} - 1 \right) \frac{P'_2 - P'_1}{\Delta x} \quad (3.20)$$

Así pues, obteniendo dos medidas de presión en dos puntos diferentes, P'_1 y P'_2 , se puede calcular la velocidad y realizando el cociente entre presión y velocidad se calcula la impedancia acústica.

4. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

Imponer correctamente las condiciones de contorno en un modelo termo-acústico es de vital importancia para obtener resultados que sean representativos del proceso real. Gracias a la técnica de los dos micrófonos y apoyándose en la instalación que a continuación se describirá, se calcularán las diferentes impedancias acústicas que permitan imponer estas condiciones.

4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Con el objetivo de poder realizar diferentes ensayos para calcular la impedancia acústica de orificios se utilizó una instalación con la siguiente configuración (Figura 4.1):

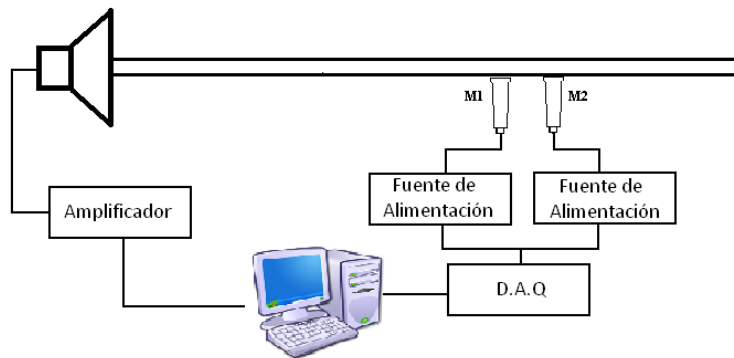


Figura 4.1 Esquema de la instalación

La instalación consta de un tubo, en el que en un extremo se dispone un altavoz y en el otro se irán colocando ampliaciones de tubo con diferentes diámetros de orificio. En dos puntos intermedios del tubo hay dos tomas en las que se sitúan los micrófonos.

Los componentes que forman parte de la instalación son, aparte de los ya mencionados, dos fuentes de alimentación, una tarjeta de adquisición de datos y un amplificador.

En los *Anexos H e I* se desarrolla de forma pormenorizada el funcionamiento de cada uno de los aparatos que están involucrados en el proceso de adquisición de datos.

Los parámetros geométricos de la instalación son:

- Longitud total del tubo: 1.54 m
- Distancia entre micrófonos: 0.05 m
- Distancia entre el punto central micrófonos y el altavoz: 1.265 m
- Diámetro interno del tubo: 0.026 m
- Longitud total del tubo al colocar un orificio: $1.54+0.2885$ m

En la Figura 4.2 se muestran la instalación experimental existente utilizada:

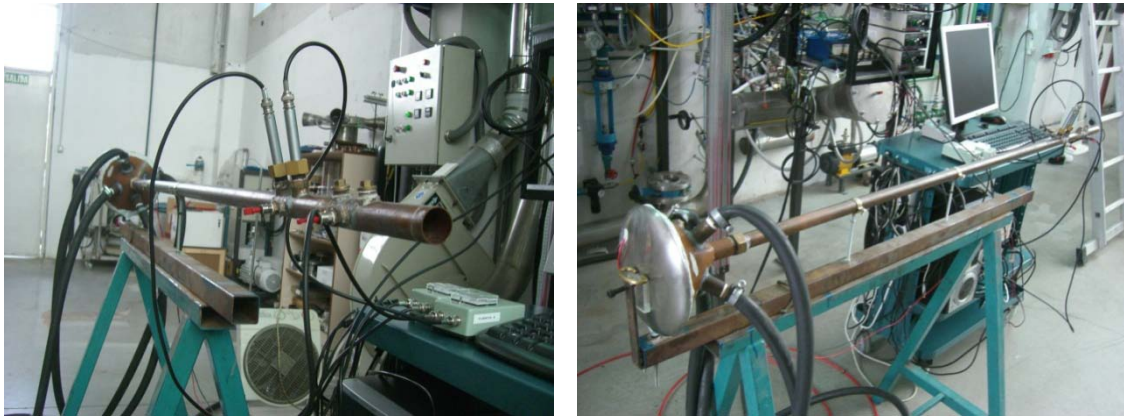


Figura 4.2 Banco de ensayos

El proceso llevado a cabo para realizar los diferentes ensayos es el siguiente: Mediante una señal introducida por el ordenador, el altavoz comienza a vibrar a una frecuencia fijada por el usuario, la fluctuación de velocidad (inducida por la vibración de la membrana del altavoz) produce a lo largo del tubo una fluctuación de presión, que se registra en los dos puntos en los que se han instalado los micrófonos.

Los valores de fluctuaciones de presión son enviados a un ordenador y se procesan mediante el programa informático MATLAB [15].

4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los diferentes parámetros que se pueden modificar a través del ordenador para conseguir distintas condiciones de ensayo son los que a continuación se enumeran:

- Frecuencia de excitación: Desde el punto de vista teórico no existe una limitación en el rango de frecuencias, aunque sí desde un punto de vista práctico. Durante el presente proyecto se realizaron ensayos con un intervalo de frecuencia de 100 Hz a 1000 Hz, aunque en ocasiones se llegó a excitar con una frecuencia de tan sólo 20 Hz. Este rango de frecuencias se considera adecuado debido a que:
 - a) En los procesos reales éste es el rango de frecuencias de interés.
 - b) Los micrófonos tienen ciertas limitaciones para bajas frecuencias. Tal y como se comprueba en el *Anexo I*.
 - c) Para altas frecuencias la relación señal/ruido es mayor.
- Amplitud: Con este parámetro se induce una tensión en el altavoz que es la que hace vibrar con mayor o menor fuerza su membrana. Teóricamente interesa realizar ensayos con amplitudes altas para tratar de eliminar las perturbaciones que pueda provocar el ruido de la instalación, pero se debe tener en cuenta que los micrófonos tienen una limitación de $\pm 5.25 V$ en la medida, por lo que para tensiones mayores el micrófono se satura y en este caso las medidas del ensayo no son válidas.

- Tiempo y frecuencia de muestreo de la señal: Desde el programa de adquisición se puede determinar la cantidad de datos que se quieren obtener por segundo. Durante el proyecto se han tomado 20000 muestras/segundo durante 2 segundos, es decir, 40000 muestras/ensayo, ya que un mayor número de datos aumentaría el coste computacional y con menos datos la precisión en los cálculos de las impedancias acústicas disminuye.

4.3 CALIBRACIÓN DE LOS MICRÓFONOS

El objetivo de la calibración de los micrófonos es que ambos tengan la misma respuesta ante fluctuaciones de presión. Si bien esto no supone una calibración absoluta de los sensores, dado que los resultados se obtienen a partir de diferencias entre las señales, resulta crítico que la respuesta de los dos micrófonos sea idéntica.

El proceso seguido es colocar cada micrófono en una posición determinada y realizar un barrido de frecuencias (desde 100Hz hasta 1000Hz) midiendo las fluctuaciones de presión, e intercambiar sus posiciones para realizar otro barrido.

La notación tomada es la siguiente: M_{ij} la letra “i” hace referencia al micrófono usado, mientras que la letra “j” indica la posición. Para el valor $j=1$ nos referiremos a la posición más cercana al altavoz y $j=2$ indicará la posición más alejada del mismo. En la Figura 4.3 se representa un esquema de la instalación con las dos configuraciones:



Figura 4.3 Esquema proceso de calibración

A continuación se explica el proceso llevado a cabo para calibrar los micrófonos tanto en amplitud como en fase, para posteriormente mostrar los resultados.

FACTOR DE CALIBRACIÓN EN AMPLITUD

El proceso de calibración de los dos micrófonos en amplitud ha sido la siguiente:

Se toma como referencia el micrófono 2, y se procede a calcular el factor de calibración (f_{cal}) del micrófono 1.

$$A_{1j}^{esperada} = f_{cal} \cdot A_{1j}^{medida} \quad (4.1)$$

$$A_{2j}^{esperada} = A_{2j}^{medida} \quad (4.2)$$

$$f1 = \frac{A_{11}^{medida}}{A_{22}^{medida}} = \frac{A_{11}^{esperada}}{f_{cal} \cdot A_{22}^{medida}} \quad (4.3)$$

$$f2 = \frac{A_{21}^{medida}}{A_{12}^{medida}} = \frac{f_{cal} \cdot A_{21}^{esperada}}{A_{12}^{medida}} \quad (4.4)$$

$$F = \frac{f2}{f1} = \frac{\frac{f_{cal} \cdot A_{21}^{esperada}}{A_{12}^{medida}}}{\frac{A_{11}^{esperada}}{f_{cal} \cdot A_{22}^{medida}}} = f_{cal}^2 \quad (4.5)$$

Por lo que realizando los ensayos para las dos posiciones diferentes, se puede calcular la relación $\frac{f_2}{f_1}$ y con esto, obtener el factor de calibración en amplitud según la Ecuación (4.5).

FACTOR DE CALIBRACIÓN EN FASE:

Definiendo la fase del micrófono “i” en la posición “j” como ϕ_{ij} se puede calcular el desfase de calibración (ξ) según:

$$\xi = \phi_{11} - \phi_{21} = \phi_{12} - \phi_{22} \quad (4.6)$$

$$\text{Diferencia de fases configuración “normal”}: \xi_{12} = \phi_{11} - \phi_{22} = (\xi + \phi_{21}) - \phi_{22} \quad (4.7)$$

$$\text{Diferencia de fases configuración “invertida”}: \xi_{21} = \phi_{21} - \phi_{12} = \phi_{21} - (\xi + \phi_{22}) \quad (4.8)$$

$$\text{Restando las ecuaciones: } \phi_{12} - \phi_{21} = 2\xi \Rightarrow \xi = \frac{\phi_{12} - \phi_{21}}{2} \quad (4.9)$$

En la Figura 4.4 se puede se representa el factor de calibración en amplitud (imagen de la izquierda) y el factor de calibración en fase (imagen de la derecha).

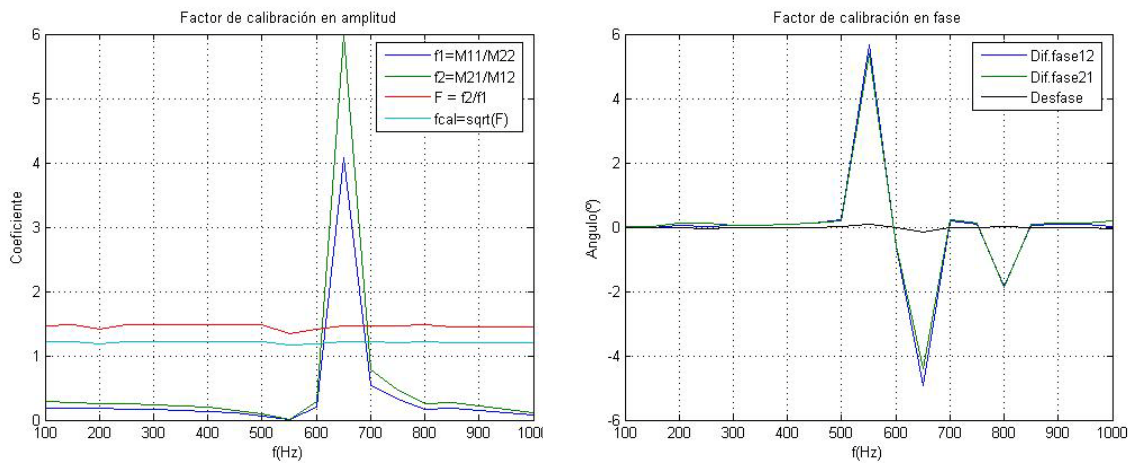


Figura 4.4 Factor de calibración de los micrófonos en amplitud y fase

En ambos casos el factor a corregir es constante en el dominio de la frecuencia, en el caso del factor en amplitud es de 1.21 y en fase de $7.4e-3^\circ$.

5. PROCESO DE MONTAJE DE LA INSTALACIÓN

Utilizando el método de los dos micrófonos y debido a que con la instalación inicial únicamente se podían medir impedancias de salida a causa de la posición relativa entre altavoz y micros, se procedió a modificar dicha instalación para poder calcular impedancias tanto de entrada como de salida, intentando que la configuración fuera lo más sencilla posible para este cometido. A partir de ahora a la instalación antigua y la propuesta se les llamará Configuración 1 y 2 respectivamente.

Tras plantear diferentes posibilidades que permitieran medir estas impedancias, se decidió realizar la siguiente configuración para el banco de ensayos (Figura 5.1):

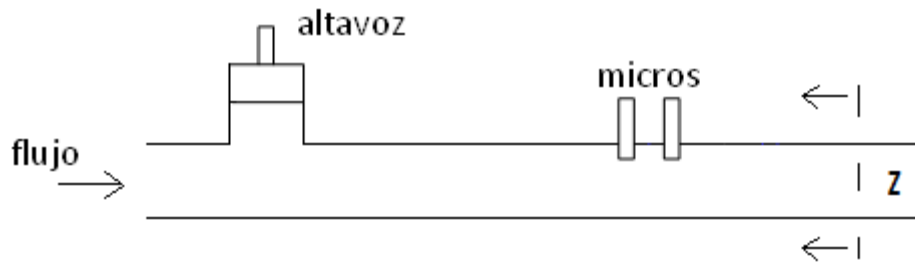


Figura 5.1 Esquema de la Configuración 2 para medir impedancias de salida

El altavoz está unido al tubo principal con una T, con esta distribución se pueden medir impedancias de salida. Colocando la T al otro lado de los micros se podrán calcular impedancias de entrada.

En la Figura 5.2 se puede observar el esquema de la Configuración 2 para medidas de impedancias acústicas de orificios de entrada:

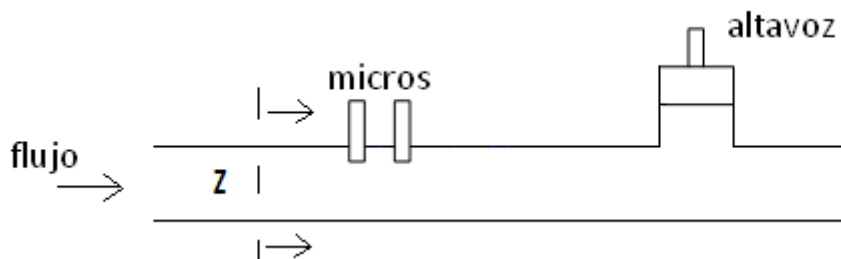


Figura 5.2 Esquema de la Configuración 2 para medir impedancias de entrada

En el *Anexo J* se muestran una serie de fotografías de la instalación propuesta en sus diferentes configuraciones.

A parte de las modificaciones que se efectuaron se pretendió reducir el ruido que se generaba en la anterior instalación, debido a la forma de introducir el flujo, ya que al inyectar el flujo se observaban grandes perturbaciones de presión para caudales altos, posiblemente debido a los

cambios de sección y dirección del flujo o a que los chorros de entrada estaban orientados hacia la membrana del altavoz.

Para tratar de reducir este ruido se colocó al principio de la instalación una precámara donde se dispuso un material que reflejara o absorbiera las ondas que le llegaban, es decir, que no transmitiera nada (simulando una cámara anecoica). Después de realizar algunos ensayos con diferentes materiales, el que mejor resultados dio fue la utilización de una empaquetadura de fibras de níquel.

Al introducir las mallas de níquel en la precámara se comprobó que los niveles de densidad de potencia espectral (PSD) se reducían drásticamente. La PSD muestra la fuerza de la variación de una señal como función de la frecuencia y es proporcional al cuadrado de la amplitud de la señal. Por este motivo es interesante que su valor sea lo menor posible.

Éste no es el único factor que hay que considerar, pues a mayor cantidad de material las pérdidas de carga existentes al introducir flujos altos aumentan notablemente por lo que hay que buscar un compromiso entre disminución de ruido y aumento en la pérdida de carga.

Tras realizar algunos ensayos se llegó a la conclusión de que el número óptimo de mallas era de cinco, ya que se reducía notablemente la PSD respecto al caso de que hubiera cuatro, y apenas se reducía al poner seis. Además, la pérdida de carga con cinco era notablemente menor que al colocar una más.

En la Tabla 5.1 se muestran los resultados obtenidos de PSD para diferente número de mallas en la precámara y distintos caudales. En cada casilla de la tabla está el valor máximo de la PSD y el valor promedio en el rango de frecuencias de estudio.

	Q=0 m ³ /h	Q=11 m ³ /h	Q=19,6 m ³ /h	Q=32,5 m ³ /h
0 mallas	7,05E-04 1,65E-06	0,0683 0,002	0,4604 0,017	6,6944 0,1127
3 mallas	4,30E-04 1,46E-05	0,0428 0,0018	0,2653 0,0113	0,8936 0,0429
4 mallas	0,0045 1,22E-05	0,0303 0,0012	0,1062 0,0065	0,4367 0,0213
5 mallas	9,33E-04 5,00E-06	0,0265 6,96E-04	0,1067 0,0033	0,1873 0,0089
6 mallas	0,0026 4,80E-06	0,0252 5,20E-04	0,098 0,002	0,1523 0,0064

Tabla 5.1 Valor máximo y promedio de PSD para diferente número de mallas y caudales

Analizando los datos de la tabla, comprobamos como de la situación inicial (0 mallas) a la situación propuesta (5 mallas) los niveles de la PSD se reducen notablemente, y que esta diferencia es mayor para altos caudales. Esta mejora permitirá el cálculo de impedancias para elevados caudales, algo que no se podía realizar con la instalación de partida.

En la siguiente figura, Figura 5.3, se representa para un caudal de $11 \text{ m}^3/\text{h}$ los niveles de PSD que se mostraron en la tabla anterior cuando no hay mallas de níquel y cuando se colocan el número óptimo (5 mallas):

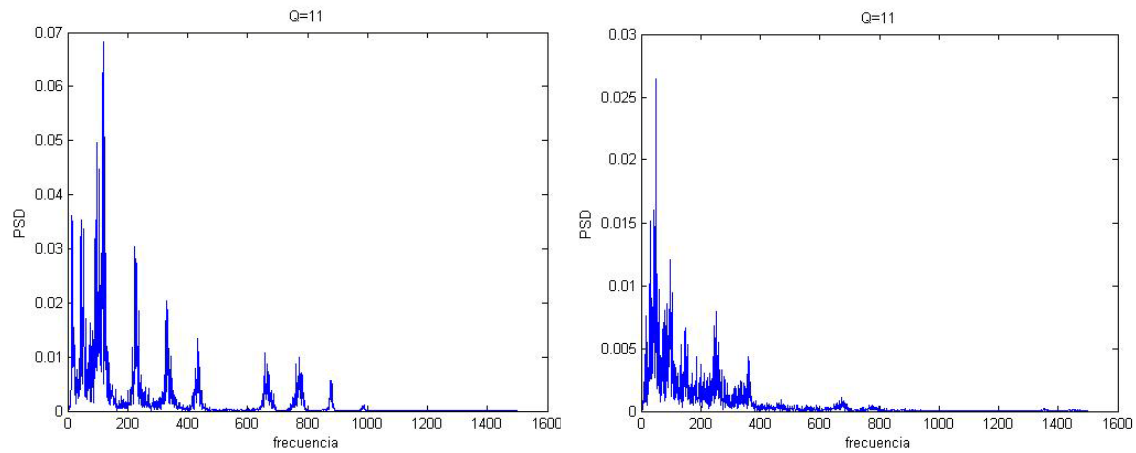


Figura 5.3 PSD para $Q=11 \text{ m}^3/\text{h}$. 0 vs 5 mallas

Representando la fluctuación de presión que mide uno de los micrófonos con la Configuración 1 y con la Configuración 2 y la empaquetadura de fibras de níquel, se puede observar las mejoras realizadas. Esto se traducirá en la obtención de resultados más precisos. En la Figura 5.4 se representa esta fluctuación de presión (Pascales) para un caudal de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ y una frecuencia de ensayo de 400 Hz.

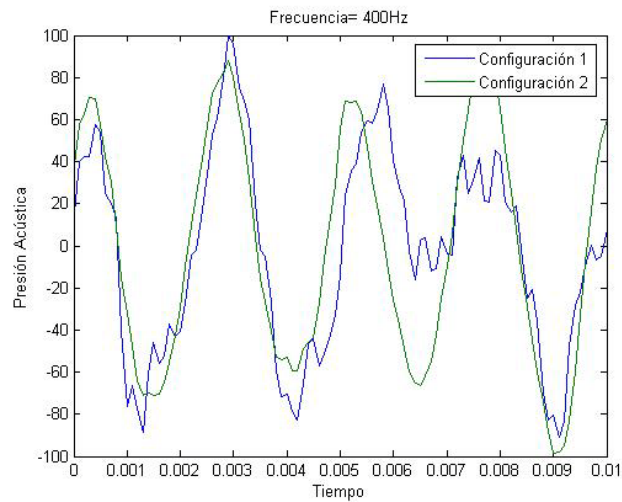


Figura 5.4 Comparación fluctuación presión Configuración 1 y 2

6. MEDIDA DE IMPEDANCIAS ACÚSTICAS

Una vez que los micrófonos están calibrados ya se puede comenzar a medir las primeras impedancias acústicas. Para validar que el proceso es el adecuado, se compararán las medidas experimentales con los resultados teóricos [5].

6.1 COMPARACIÓN MEDIDAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES SIN FLUJO

En primer lugar se realizaron ensayos en la situación más sencilla, la instalación descargando libremente a la atmósfera (no hay orificio en la salida) y sin caudal (de esta forma no se introducen fallos en las medidas debidas al ruido que produce la introducción de flujo en la instalación).

En la Figura 6.1 se muestra una comparación entre la impedancia acústica medida para la Configuración 1 y 2 y la teórica [2], y de esta forma comprobar si las modificaciones realizadas dan resultados positivos.

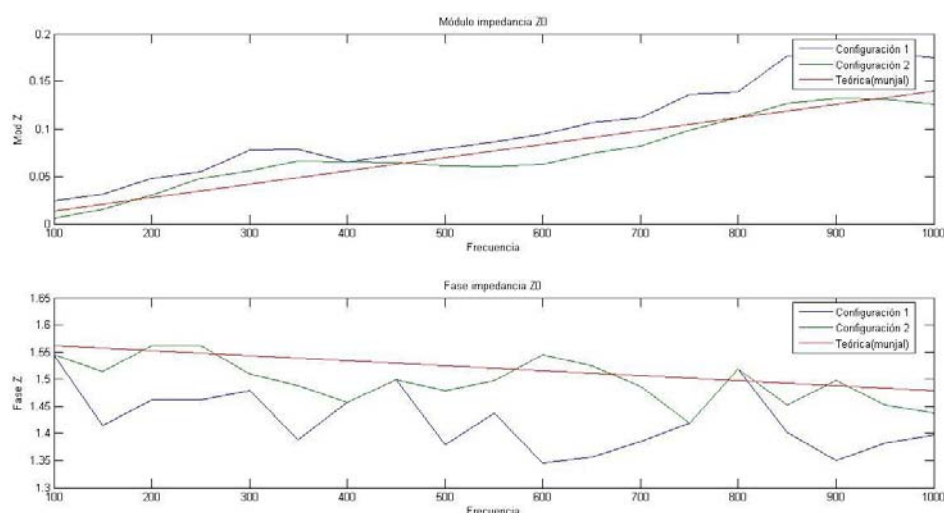


Figura 6.1 Comparación medida experimental Z_0 con expresión teórica sin flujo en configuración 1 y 2

Como se puede constatar en la figura las mejoras realizadas en la instalación son notables, ya que tanto el módulo como la fase de la impedancia son más precisos (ajustan mejor a la expresión teórica) con el banco de ensayos modificado. En la Tabla 6.1 se cuantifican los resultados obtenidos:

	RESUMEN DE RESULTADOS	
	Configuración 1	Configuración 2
Diferencia respecto Módulo teórico (%)	39,72	18,11
Diferencia respecto Fase teórica (%)	6,40	2,20

Tabla 6.1 Comparación resultados sin flujo

En la figura anterior se comparaba la impedancia en un punto determinado (la descarga) para diferentes frecuencias. Otra forma de verificar si las impedancias medidas son correctas es comparar la impedancia a lo largo del tubo para una frecuencia dada. Utilizando la Ecuación (3.14) se puede calcular la impedancia que hay en cualquier punto de la instalación.

El desarrollo matemático empleado para trasladar la impedancia a lo largo del espacio se muestra en el *Anexo E*.

En la Figura 6.2 se representan las diferentes impedancias acústicas que hay a lo largo del tubo para una frecuencia de 800 Hz.

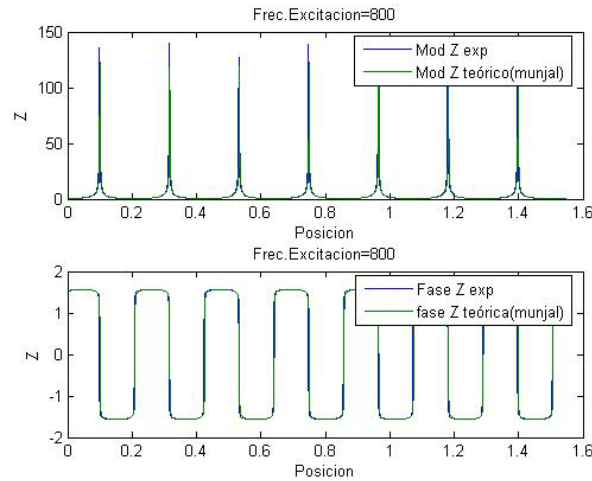


Figura 6.2 Comparación medida experimental y expresión teórica a lo largo del tubo sin flujo

En este caso solo se muestra la figura para la Configuración 1, ya que los resultados obtenidos con la propuesta son muy similares.

En la gráfica del módulo se puede distinguir que existen unos picos equiespaciados, esto es debido a que la impedancia, tal y como se explicó anteriormente, se define como el cociente entre fluctuación de presión y velocidad, la onda de velocidad tendrá una longitud que será igual a c/f , es decir, que cada media longitud de onda habrá un nodo de velocidad. Para una frecuencia de 800Hz y velocidad del sonido de 346.1 m/s (suponiendo 25°C) cada 0.22 metros existe un cero de velocidad, tal y como se comprueba en la figura anterior.

Por último, utilizando la expresión teórica de las fluctuaciones de presión, Ecuación (3.12), se puede reproducir la fluctuación de presión que deberían haber medido los micros. Para utilizar las Ecuaciones (3.13) y (3.14) se necesitan imponer dos condiciones de contorno, en el caso de Configuración 1, una fluctuación de velocidad debida al altavoz y la impedancia acústica experimental del extremo del tubo.

Condiciones de contorno:

$$\begin{cases} \vec{u}'(x = -L, t) = Amp * e^{i\omega t} \\ \frac{Z(x = 0)}{\rho c} = \frac{Z_0}{\rho c} \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} D^+ &= \frac{Amp * \rho c (Z_0 + 1) e^{\frac{ikL}{1+M}}}{(Z_0 + 1) e^{\frac{i2kL}{1-M^2}} - (Z_0 - 1)} \\ D^- &= D^+ \frac{Z_0 - 1}{Z_0 + 1} \end{aligned} \quad \begin{aligned} (6.1) \\ (6.2) \end{aligned}$$

En la Figura 6.3 se representan la fluctuación teórica de presión tras imponer las dos condiciones de contorno y la fluctuación de presión que se midió con los micros en la Configuración 1 para una frecuencia de 800 Hz.

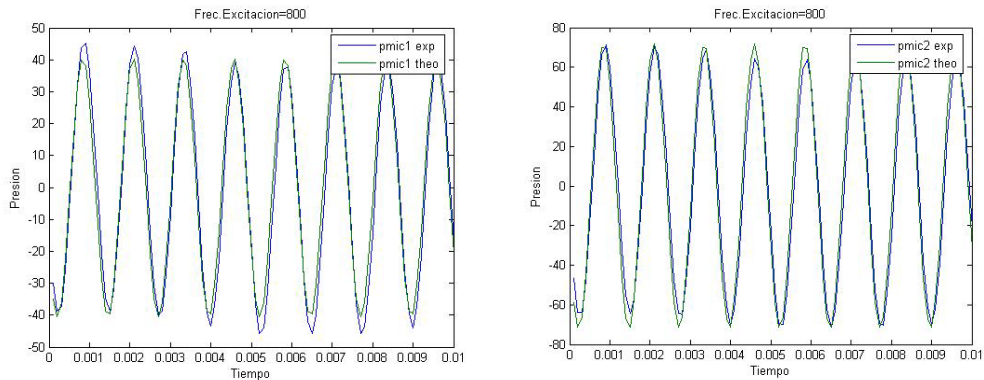


Figura 6.3 Comparación fluctuaciones de presión sin flujo

Como se observa la reconstrucción de la onda de presión utilizando las expresiones teóricas da resultados muy similares a los obtenidos experimentalmente. Tras realizar las tres comprobaciones (comparación impedancia de descarga, comparación impedancia a lo largo del tubo y reconstrucción de la onda de presión) se llega a la conclusión de que cuando no existe flujo medio en la instalación el procedimiento de medición es el adecuado.

En el caso de la configuración 1 se ha podido reconstruir la onda de presión ya que las dos condiciones de contorno son, por un lado, la impedancia de salida y, por el otro, la fluctuación de velocidad debida al altavoz en la entrada. En el caso de la Configuración 2 todavía no se puede resolver el sistema ya que falta determinar la impedancia de entrada. Cuando se mida la impedancia de entrada se podrá resolver el sistema completo y comprobar si las fluctuaciones de presión teóricas y experimentales son las mismas. Esta comprobación también servirá para validar que esta impedancia ha sido medida correctamente.

6.2 COMPARACIÓN MEDIDAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES CON FLUJO

Para este caso se procederá de forma idéntica a la situación anterior. Las diferentes gráficas que se muestran en el presente apartado son para un caudal de $10 \text{ m}^3/h$.

Tal y como se ha comentado, la introducción de flujo en la instalación provoca que la relación de señal-ruido sea menor por lo que puede ser comprensible que en los resultados que se obtengan existan mayores discrepancias que en el caso en el que no circula flujo. La Figura 6.4 compara la impedancia de descarga teórica y la obtenida experimentalmente para ambas configuraciones cuando circula flujo en la instalación y no hay orificio.

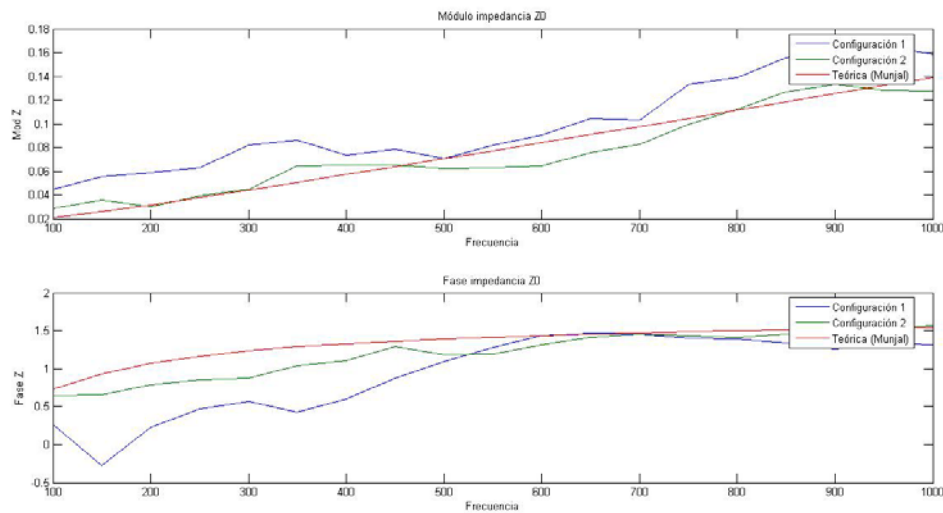


Figura 6.4 Comparación medida experimental Z_0 con expresión teórica con flujo en configuración 1 y 2

Estos resultados confirman que en la instalación modificada (Configuración 2) se obtienen resultados que se ajustan mejor a la impedancia acústica teórica. Resulta interesante comentar que las mayores diferencias se producen para frecuencias bajas, esto es debido a que el ruido que hay en la instalación es considerablemente mayor para estas frecuencias tal y como se observa en la Figura 5.3. En la Tabla 6.2 se comparan los resultados para este caso:

	RESUMEN DE RESULTADOS	
	Configuración 1	Configuración 2
Diferencia respecto Módulo teórico (%)	40,72	12,84
Diferencia respecto Fase teórica (%)	33,97	11,72

Tabla 6.2 Comparación resultados con flujo

Siguiendo el mismo esquema utilizado en el caso sin flujo medio, la siguiente prueba es comparar la impedancia a lo largo del tubo fijando la frecuencia. Los resultados obtenidos son muy similares a los mostrados en la Figura 6.2 por lo que se omite la gráfica.

Finalmente, en la Figura 6.5 se representa la fluctuación de presión teórica y medida por los micrófonos. Las dos condiciones de contorno serán las mismas que anteriormente, una fluctuación de velocidad en un extremo del tubo y la otra de impedancia acústica experimental en el otro extremo.

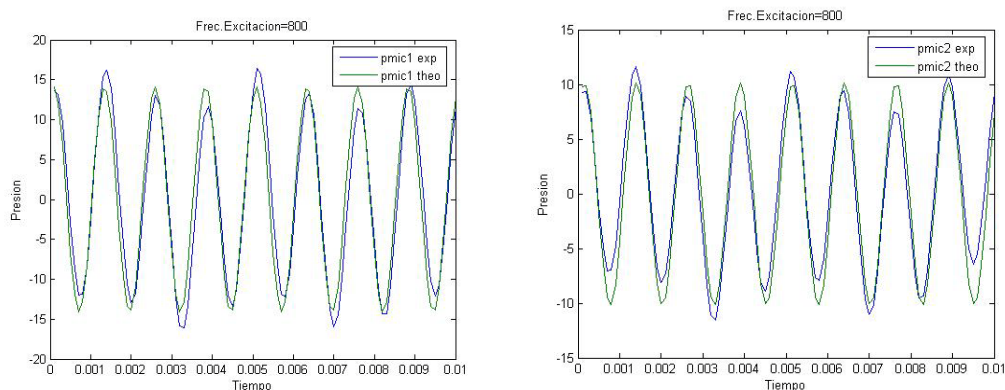


Figura 6.5 Comparación fluctuaciones de presión con flujo

En este caso se puede apreciar que en la fluctuación de presión experimental de ambos micrófonos la frecuencia principal es la ensayada (800 Hz), pero que también aparecen otras frecuencias más bajas debidas, posiblemente, al ruido introducido al hacer circular flujo medio por la instalación.

De todos los resultados obtenidos en el presente capítulo se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- El método empleado de medida de impedancias acústicas funciona correctamente, ya que se ajusta bien a las expresiones propuestas en la literatura y las comprobaciones realizadas demuestran que describen correctamente la acústica del sistema.
- Gracias a la nueva configuración de la instalación se ha conseguido obtener resultados más precisos.

Una vez se ha verificado que las mediciones son correctas, se puede comenzar a medir impedancias de orificios para diferentes condiciones, para los que no existen resultados previos en la literatura. Para la medición de estas impedancias se utilizará la instalación modificada, que ha demostrado un comportamiento claramente mejor cuando existe flujo medio en el conducto.

7. MEDIDA DE IMPEDANCIAS ACÚSTICAS DE ORIFICIOS

En los próximos apartados se resumen los resultados obtenidos mediante la técnica de los dos micrófonos para las impedancias de orificios de salida y de entrada.

7.1 MEDIDA DE IMPEDANCIA ACÚSTICA DE ORIFICIOS DE SALIDA

El diámetro de los orificios de salida que se estudiaron fue de 15mm, 12mm, 10mm y 5mm con caudales que hacían que en el orificio hubiese un Mach inferior a 0.1.

Antes de empezar a realizar los ensayos para distintos diámetros de orificios y diferentes caudales al objeto de tenerlos totalmente caracterizados, se planteó alguna comprobación para poder corroborar que las mediciones eran correctas.

COMPROBACIÓN

El objetivo final es medir impedancias de orificios de salida, que es totalmente independiente de lo que haya aguas arriba de los mismos, por lo que se decidió colocar el orificio de estudio al final de la instalación, medir su impedancia y posteriormente alargar el tubo principal para volver a medirla. Si ambos resultados coinciden, se puede concluir que las medidas no dependen de la configuración concreta de la instalación y que la impedancia obtenida describe correctamente el comportamiento acústico del orificio.

En la Figura 7.1 se realiza esta comparación. En el caso ideal los resultados obtenidos deberían de ser idénticos.

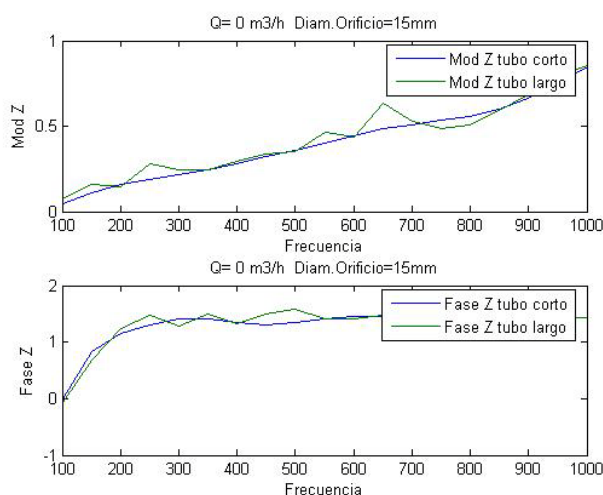


Figura 7.1 Comparación impedancia orificio de salida con diferentes longitudes de tubo

Como se puede verificar los resultados son muy similares, por lo que indica que el proceso seguido para medir impedancias acústicas de orificios es el correcto y ya se pueden realizar diferentes medidas de orificios para distintos caudales.

En el *Anexo F* se recogen las diferentes medidas experimentales de las impedancias al modificar el diámetro del orificio de salida. En la Figura 7.2 aparecen los resultados experimentales obtenidos para un Mach de 0.015 en el orificio y los diferentes diámetros de estudio.

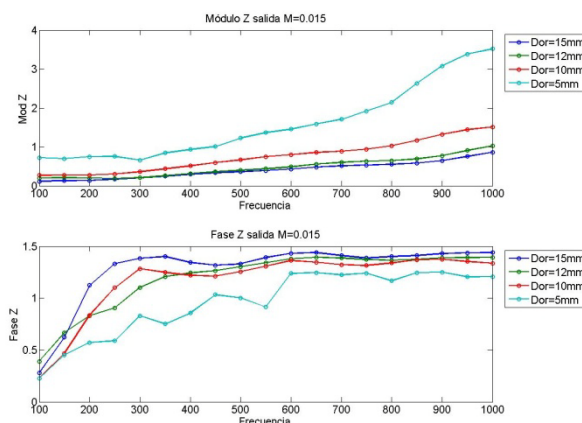


Figura 7.2 Impedancia orificio de salida M=0.015

Como se puede observar en la Figura 6.4, en el caso de que no haya orificio la fase tiende a $\frac{\pi}{2}$ al aumentar la frecuencia. Para los distintos orificios se comprueba que para frecuencias altas la fase tiende a un valor constante, y que en el caso del orificio de mayor diámetro, que es la condición más cercana a no haber orificio, el valor de la fase se aproxima a este supuesto. Esto es un buen indicio que confirma que las mediciones son correctas.

7.2 MEDIDA DE IMPEDANCIA ACÚSTICA DE ORIFICIOS DE ENTRADA

En este caso los diámetros estudiados fueron de 25mm, 15mm, 10mm y 5mm, y en este caso, se acomodó el caudal para que el número Mach máximo en el orificio fuese de 0.05.

Para estas medidas también se realizó alguna comprobación para confirmar que se estaba midiendo correctamente.

COMPROBACIÓN

Al igual que antes, si se realiza una medida de la impedancia de entrada y se modifica la longitud del tubo principal, los resultados obtenidos deberían de ser similares ya que la impedancia no depende de la geometría de la instalación. En la Figura 7.3 se muestran los resultados para dos longitudes de tubo diferentes:

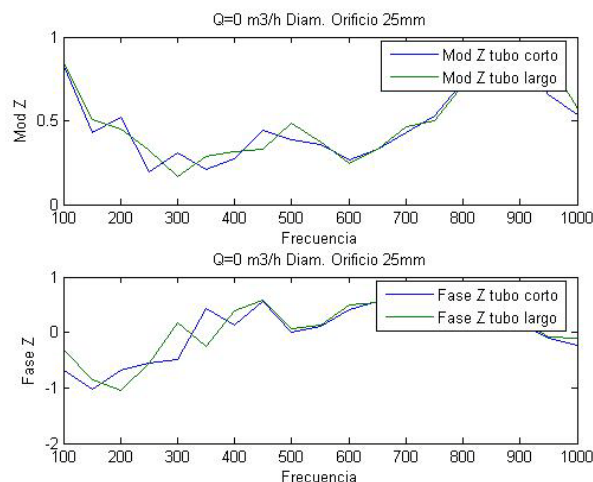


Figura 7.3 Comparación impedancia orificio de entrada con diferentes longitudes de tubo

En este caso, aunque con mayores discrepancias que en el caso de orificio de salida, los valores obtenidos son razonablemente parecidos independientemente de la longitud total del tubo de la instalación.

Gracias a esta comprobación se puede concluir que el proceso seguido de medida es el correcto por lo que ya se pueden realizar ensayos para caracterizar las impedancias de orificios de entrada para distintos caudales.

En el *Anexo F* se recogen las diferentes medidas de las impedancias acústicas de orificios de entrada. En la Figura 7.4 se presentan para un Mach en el orificio de 0.015 los resultados experimentales al variar el diámetro de entrada.

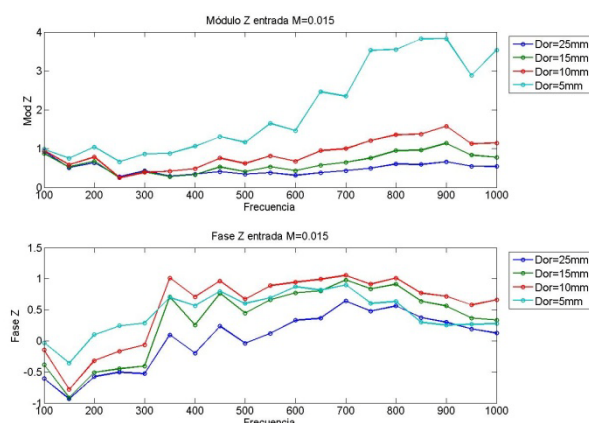


Figura 7.4 Impedancia orificio de entrada $M=0.015$

Como se puede observar aparecen claras tendencias, por lo que teniendo este indicio unido al haber realizado la comprobación, se puede asumir que las medidas de impedancias acústicas de orificios de entrada son correctas.

Una vez realizadas todas las medidas de impedancias (tanto de entrada como de salida) ya se puede pasar a resolver el sistema completo (que no se pudo resolver anteriormente para la Configuración 2) y comparar las fluctuaciones de presión que se midieron experimentalmente con las que se obtienen teóricamente.

7.3 RESOLUCIÓN DEL SISTEMA ACÚSTICO COMPLETO

Con las medidas experimentales de las impedancias acústicas de entrada y salida realizadas, en principio se puede resolver cualquier sistema que tenga como condición de contorno estos resultados.

Para dar validez a las medidas, se realizará un modelo acústico en el que como condición de contorno se impongan estos datos. Para unas determinadas condiciones de contorno de la instalación se medirá la fluctuación de presión que miden los micrófonos y también se calculará computacionalmente para comparar si esta fluctuación es igual en ambos casos. El objetivo de este apartado es usar un método general para modelar la acústica de nuestra instalación como un sistemas de conductos unidos entre sí mediante las condiciones de unión (cambios de sección,...) y limitado por las condiciones de contorno (impedancias).

Utilizando los invariantes de Riemann [4] (ver *Anexo D*) se pueden describir completamente todas las variables acústicas de un sistema. Planteando las ecuaciones de conservación en el contorno del sistema y en las diferentes uniones entre los elementos que lo forman, se puede caracterizar el comportamiento acústico de un sistema completo.

En el anexo anterior (*Anexo D*) se recoge como se pueden caracterizar estos diferentes elementos.

Utilizando este modelo, y haciendo uso de las impedancias determinadas experimentalmente, se puede calcular la fluctuación de presión y/o de velocidad en cualquier punto de una instalación. El estudio se ha realizado para el banco de ensayos utilizado para la técnica de los dos micrófonos (ver Figura 5.1), que se puede modelar como un sistema acústico compuesto por los elementos que se muestran en el croquis de la Figura 7.5:

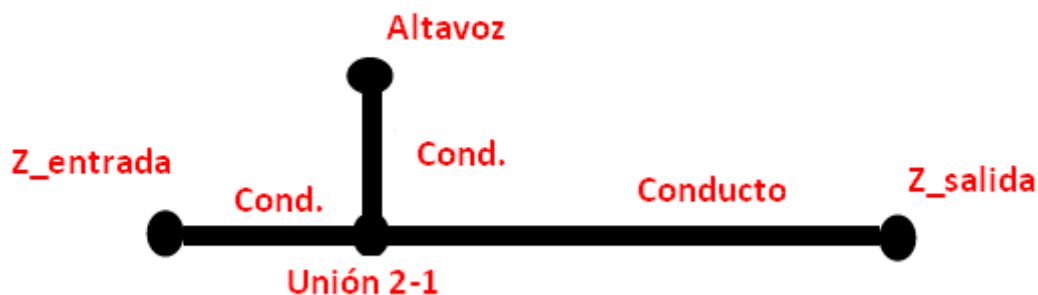


Figura 7.5 Modelo acústico para instalación propuesta

En la Figura 7.6 se compara la relación entre las fluctuaciones de presión de los micrófonos 1 y 2 que se obtienen al aplicar el modelo propuesto y los resultados que se obtienen experimentalmente.

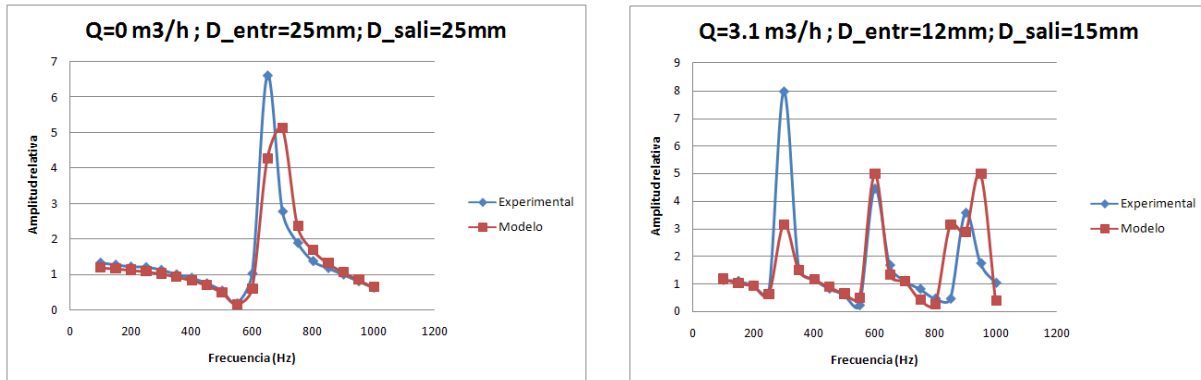


Figura 7.6 Comparación del cociente de fluctuación de presión experimental y según modelo acústico

Como se puede observar en la figura anterior, los resultados obtenidos en el modelo acústico se asemejan bastante a las medidas experimentales. Los únicos puntos en los que aparecen mayores discrepancias son en los picos de las gráficas. Esto es debido a la forma de representación de los datos, al mostrarse el cociente entre las fluctuaciones de presión de los micrófonos, cuando en el micrófono dos haya un nodo de presión la relación va a tender a infinito por lo que en estos puntos no puede realizarse una comparación cuantitativa.

A partir de los resultados del modelo acústico se puede concluir que las medidas de impedancias de orificios realizadas son correctas, dado que describen correctamente el comportamiento acústico del sistema. En el siguiente capítulo se realizará un estudio de los fenómenos de inestabilidades termo-acústicas y se utilizarán las medidas realizadas de las impedancias acústicas de orificios para fijar las condiciones de contorno en un modelo diseñado para identificar las frecuencias inestables de una instalación.

8. MODELO TERMO-ACÚSTICO

Los fenómenos de inestabilidades termo-acústicas consisten en la realimentación positiva entre fluctuaciones acústicas y la fluctuación de la liberación de calor en la cámara durante la combustión, dando lugar a oscilaciones que se pueden amplificar rápidamente.

Llamaremos modos inestables a aquellos en que las fluctuaciones de calor y acústicas se acoplan pudiendo producir devastadoras consecuencias para la instalación. Por otro lado, también se dan otros modos (estables) que se disipan rápidamente.

El criterio de Rayleigh [14] es el que se utiliza para comprobar si puede haber alguna inestabilidad termo-acústica:

$$\int_0^{T_{osc}} \int_V [p'(V, t) \dot{Q}'(V, t) - \phi(V, t)] dV dt > 0 \quad (8.1)$$

En la expresión anterior, el producto de la fluctuación de presión y calor representa la energía acústica que se crea en el sistema en un ciclo. Esta contribución será positiva si estas dos variables se encuentren en fase o desfasadas menos de $\pi/2$. En este caso, si el producto es mayor que la disipación de energía (ϕ) se producirán inestabilidades termo-acústicas, mientras que si no se cumple esta condición el sistema será estable. La consecuencia de que el criterio se cumpla es el aumento de la amplitud de las ondas de presión, con los efectos que esto puede suponer para la instalación. En el *Anexo G* se explica el porqué de esta desigualdad [21].

La forma de resolución del modelo termo-acústico es similar a la del modelo acústico del capítulo anterior. Una vez que se ha ensamblado la matriz global de la instalación como suma de diferentes elementos (*Anexo D*) se procede a realizar el determinante de la matriz y se iguala a cero. La única incógnita en este caso es la frecuencia, que tiene una parte real y otra compleja ($\omega_n = \omega_{n,r} + i\omega_{n,i}$). Una interpretación del significado físico de la solución compleja en frecuencias se debe a la dependencia de las fluctuaciones en el tiempo, $e^{i\omega_n t}$, según la definición de “f” y “g”.

$$e^{i\omega_n t} = e^{i(\omega_{n,r} + i\omega_{n,i})t} = e^{-\omega_{n,i}t} e^{i\omega_{n,r}t} \quad (8.2)$$

Como se comprueba de la Ecuación (8.2) cuando la parte imaginaria de la frecuencia es positiva las oscilaciones decrecen exponencialmente (modo estable), mientras que si es negativa se produce una amplificación de las oscilaciones dando lugar a inestabilidad en el sistema.

La instalación de estudio será el combustor de premezcla que se encuentra en el Laboratorio de Investigación en Tecnologías de la Combustión (LITEC). Se ha escogido esta instalación para aplicar el modelo termo-acústico al poder realizar ensayos para diferentes condiciones de trabajo y comparar los resultados experimentales con los predichos por el modelo para poder ser validado.

Debido a la necesidad de fijar la condición de contorno de entrada y ante la inexistencia de una expresión teórica se procedió a su cálculo experimental utilizando la misma técnica que se empleó durante la primera parte de este proyecto. Se omite en la memoria el proceso llevado ya que es idéntico al que se siguió anteriormente.

Una vez establecida esta condición de contorno, el siguiente paso es obtener la función de transferencia de la llama (FTF, flame transfer function). La FTF describe la respuesta dinámica de liberación de calor de las perturbaciones del flujo como función de la frecuencia y las condiciones de velocidad aguas arriba de la llama (lado frío), pudiendo ser obtenida experimentalmente o de forma teórica.

$$FTF(f) = \frac{Q'(f)/\bar{Q}}{V'(f)/\bar{V}} \quad (8.3)$$

Unos de los modelos teóricos más utilizados para la FTF es el modelo n-tau [19], que la define como:

$$FTF(f) = n(f) \cdot e^{j\omega\tau} \quad (8.4)$$

Donde “n” y “τ” son factores que dependen de las condiciones de trabajo en los que opera la turbina, la frecuencia de excitación...

En este proyecto se ha realizado un estudio en el que se ha introducido una FTF teórica [12] y una función experimental [11] que se midió en anteriores trabajos de investigación. Las frecuencias obtenidas se comparan con las que se obtienen cuando no se introduce una fuente de energía debida a la combustión, es decir, si no hay FTF.

A continuación se muestran una serie de imágenes en las que se puede observar el combustor de premezcla utilizado en los ensayos, un esquema de cómo puede ser representada [13] y la configuración que se introdujo en el modelo termo-acústico [20] (Figura 8.1).

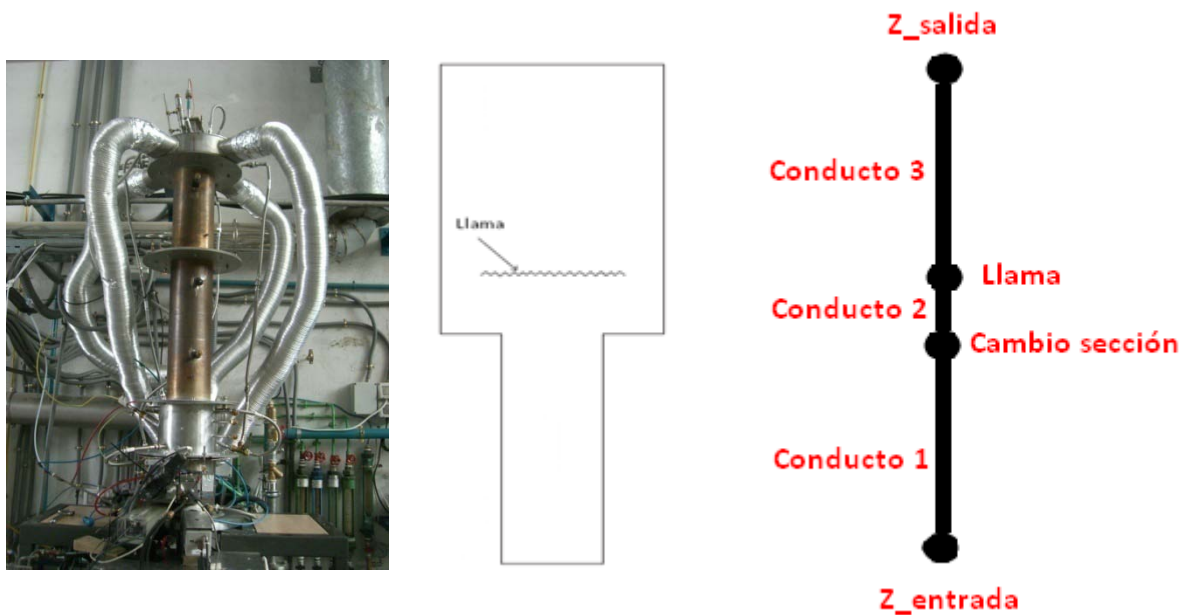


Figura 8.1 Turbina de gas, Figura esquemática y Modelo termo-acústico

En el modelo termo-acústico el conducto 1 representa el tramo de inyección de combustible en el combustor de premezcla, mientras que los conductos 2 y 3 hacen referencia a la longitud de la cámara de combustión antes y después de la llama respectivamente.

Para realizar un estudio de la influencia que tienen los orificios sobre las inestabilidades termo-acústicas se hace necesario en primer lugar validar el modelo termo-acústico. Debido a la posibilidad de poder realizar ensayos en el combustor de premezcla en distintas condiciones, se llevarán a cabo medidas de fluctuación de presión en el combustor de premezcla cuando ésta descargue libremente a la atmósfera las emisiones (en adelante se llamará a esta condición “Tapa abierta”). Con estos ensayos se comprobará a que frecuencias se producen inestabilidades. Aplicando el modelo termo-acústico bajo las mismas condiciones de los ensayos se calculará de forma computacional las frecuencias predichas por el mismo para comparar si modelo y proceso real se asemejan.

Los diferentes datos geométricos de la instalación y suposiciones realizadas son las siguientes:

- Superficie conducto 1: Corona circular con ID=25mm y OD=40 mm
- Longitud conducto 1: 630mm
- Sección conducto 2 y 3: Sección circular de 120mm de diámetro
- Longitud conducto 2: Se ha supuesto que la llama está a 5cm del cambio de sección
- Longitud conducto 3: Variable. 0.4, 0.75, 1.25m
- Caudal CH₄: 3 m³/h
- Caudal Aire: Variable según la relación de equivalencia (ER)
- Temperatura conducto 1: Atmosférica
- Temperatura conducto 2: 95% de la temperatura adiabática de la llama
- Temperatura conducto 3: La mitad de la del conducto

Un parámetro que se puede modificar fácilmente para realizar diferentes condiciones de ensayo con el combustor de premezcla es la relación de equivalencia (ER). Ésta se define como el cociente entre la relación aire-combustible estequiométrica y la que hay en la mezcla. Por ejemplo ER=1 indicaría que se está utilizando la mínima cantidad teórica de aire que permite alcanzar combustión completa, mientras que ER=0.5 corresponde a un caudal de aire igual al doble del estequiométrico.

En la Figura 8.2 se representa los resultados obtenidos para diferentes relaciones de equivalencia (ER) al realizar ensayos en la turbina de gas con la longitud de descarga (conducto 2 + 3) de 1.25m, 0.75m y 0.4m y las frecuencias que predice el modelo termo-acústico al utilizar la función de transferencia teórica.

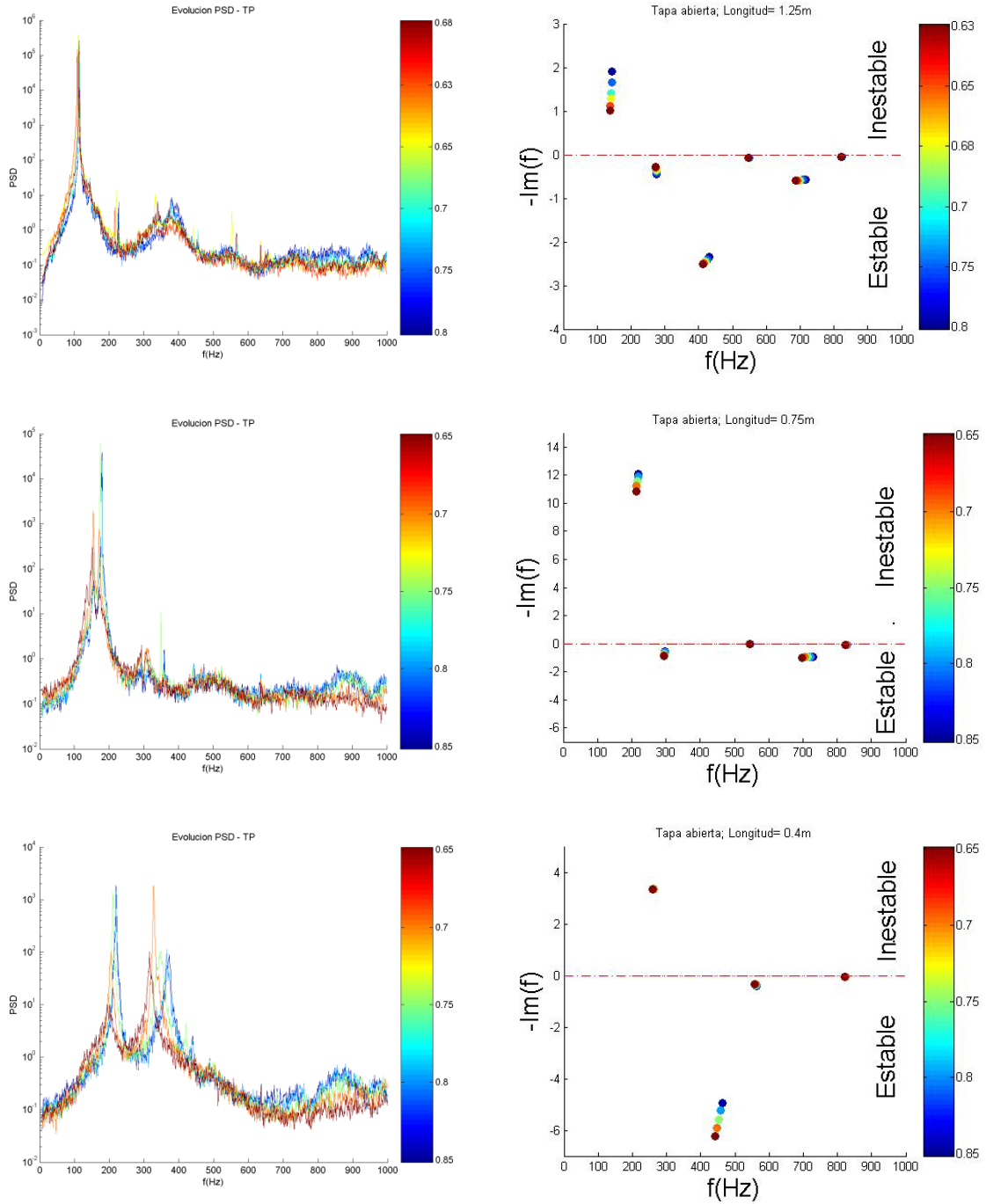


Figura 8.2 Resultados experimentales y según modelo termo-acústico

Como se puede constatar en las gráficas experimentales anteriores, para algunas frecuencias aparecen fluctuaciones de presión de varios órdenes de magnitud superiores que en el resto. Estas frecuencias corresponden a modos inestables y comparándolas con los resultados obtenidos al aplicar el modelo termo-acústico se comprueba que se asemejan razonablemente bien a la situación real. El valor de la parte imaginaria de las frecuencias obtenidas en el modelo termo-acústico representa el incremento o disminución en la relación de amplitud de la oscilación en un ciclo (growth rate). Este parámetro se define como $\Gamma = e^{-\omega_{n,i}T} - 1 = e^{-2\pi\frac{\omega_{n,i}}{\omega_{n,r}}} - 1$.

Debido a algunas aproximaciones del modelo, por ejemplo no se tiene en cuenta la disipación de energía en la instalación, el valor cuantitativo de la parte imaginaria no se debe tener en cuenta, únicamente se debe tener en consideración el carácter de esa frecuencia, es decir, su signo.

Realizando un estudio de las diferentes frecuencias que se obtienen con el modelo según la FTF introducida se puede observar las diferencias que aparecen (Tabla 8.1). En la columna de los resultados cuando no se introduce FTF se comprueba que la parte imaginaria de todas las frecuencias es nula. Esto es debido a que al no utilizar función de transferencia no se está introduciendo ninguna fuente de energía en el sistema. En la tabla se muestran los diferentes resultados hasta una frecuencia de 400 Hz ya que ese es el rango hasta el que se midió la función de transferencia experimental de la llama.

Longitud(m)	ER	Frecuencias con FTF experimental	Frecuencias con FTF Santavicca	Frecuencias sin FTF
1.25	0.83	$f_1 = 117.1 - i 2.1$ $f_2 = 267.1 + i 15.0$ $f_3 = 341.9 - i 5.3$	$f_1 = 119.9 - i 1.9$ $f_2 = 268.4 + i 0.5$	$f_1 = 118.8 - i 0.0$ $f_2 = 275.4 - i 0.0$ $f_3 = 357.0 - i 0.0$
	0.73	$f_1 = 111.3 - i 4.0$ $f_2 = 259.9 + i 19.4$ $f_3 = 328.9 - i 17.4$	$f_1 = 114.8 - i 1.6$ $f_2 = 264.2 + i 0.4$	$f_1 = 113.2 - i 0.0$ $f_2 = 273.2 - i 0.0$ $f_3 = 341.0 - i 0.0$
	0.66	$f_1 = 105.8 - i 2.1$ $f_2 = 263.9 + i 26.2$ $f_3 = 315.6 - i 6.1$	$f_1 = 111.7 - i 1.0$ $f_2 = 261.1 + i 0.3$	$f_1 = 111.0 - i 0.0$ $f_2 = 272.0 + i 0.0$ $f_3 = 334.6 + i 0.0$
0.75	0.83	$f_1 = 196.5 - i 15.8$ $f_2 = 292.1 + i 0.8$	$f_1 = 207.0 - i 12.1$ $f_2 = 297.7 + i 0.3$	$f_1 = 192.0 + i 0.0$ $f_2 = 286.0 - i 0.0$
	0.73	$f_1 = 185.7 - i 14.9$ $f_2 = 285.1 - i 2.9$	$f_1 = 204.5 - i 11.3$ $f_2 = 294.9 + i 0.6$	$f_1 = 183.5 - i 0.0$ $f_2 = 284.0 - i 0.0$
	0.66	$f_1 = 177.1 - i 7.3$ $f_2 = 276.8 + i 3.3$	$f_1 = 202.3 - i 10.5$ $f_2 = 293.1 + i 0.7$	$f_1 = 180.0 - i 0.0$ $f_2 = 283.1 - i 0.0$

Tabla 8.1 Resultados modelo termo-acústico según FTF

Longitud(m)	ER	Frecuencias con FTF experimental	Frecuencias con FTF Santavicca	Frecuencias sin FTF
0.4	0.83	$f_1 = 244.7 + i 0.3$ $f_2 = 345.2 - i 14.3$ $f_3 = 355.6 + i 32.8$	$f_1 = 297.2 - i 3.2$	$f_1 = 266.9 + i 0.0$ $f_2 = 384.5 + i 0.0$
	0.73	$f_1 = 238.2 + i 10.6$ $f_2 = 336.8 - i 31.4$ $f_3 = 346.8 + i 42.1$ $f_4 = 363.5 + i 34.0$	$f_1 = 295.1 - i 3.2$	$f_1 = 264.7 + i 0.0$ $f_2 = 368.9 - i 0.0$
	0.66	$f_1 = 241.5 + i 26.5$ $f_2 = 317.0 + i 37.8$ $f_3 = 317.6 - i 15.5$ $f_4 = 339.5 + i 26.5$	$f_1 = 292.5 - i 3.2$	$f_1 = 263.5 - i 0.0$ $f_2 = 362.4 + i 0.0$

Tabla 8.1 (Continuación) Resultados modelo termo-acústico según FTF

Algunas conclusiones que se pueden extraer de los resultados anteriores son:

- Las frecuencias del sistema (parte real) son muy similares independientemente de la función de transferencia. Esto es debido a que la acústica del sistema domina sobre la parte térmica [22].
- Viendo las fluctuaciones de presión que se dan en la turbina (Figura 8.2), la relación de equivalencia apenas modifica las frecuencias resonantes del sistema y computacionalmente se obtiene el mismo comportamiento. Estas pequeñas modificaciones en las frecuencias se debe a que la ER modifica la temperatura adiabática de la llama de la cámara de combustión y esto cambia el valor de la velocidad del sonido ($c = \sqrt{\gamma RT}$), por lo que la frecuencia característica del sistema varía en la misma proporción.
- Para las longitudes de 1.25 y 0.75 metros las frecuencias predichas por el modelo según la FTF introducida son bastante parecidas, mientras que para una longitud de 0.4 metros aparecen mayores discrepancias. Esto es debido a que a menor longitud el gradiente de temperatura del conducto es mayor y en el modelo se está suponiendo que éste tiene una temperatura constante por lo que se introduce una fuente de error.
- Cabe mencionar que, por un lado, con el modelo se puede predecir relativamente bien las frecuencias inestables de la instalación (Figura 8.2) y por otra parte, no se obtienen soluciones inestables en frecuencias que experimentalmente se comprueba que son claramente estables.

Por todo lo expuesto, se confirma que el modelo se asemeja al proceso experimental. A partir de ahora los resultados que se obtengan al imponer las diferentes condiciones de contorno de los orificios medidos serán representativos de la situación real.

Para realizar un estudio de la influencia que tienen los orificios en las inestabilidades termo-acústicas en una turbina de gas se va a suponer que:

- En la descarga existe una corona de 20 orificios
- Caudal CH₄ = 3 m³/h
- La relación de equivalencia es de 0.7
- La longitud del tramo de la cámara de combustión (conducto 2+3) varía de 0.5 a 1.5 metros.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.3:

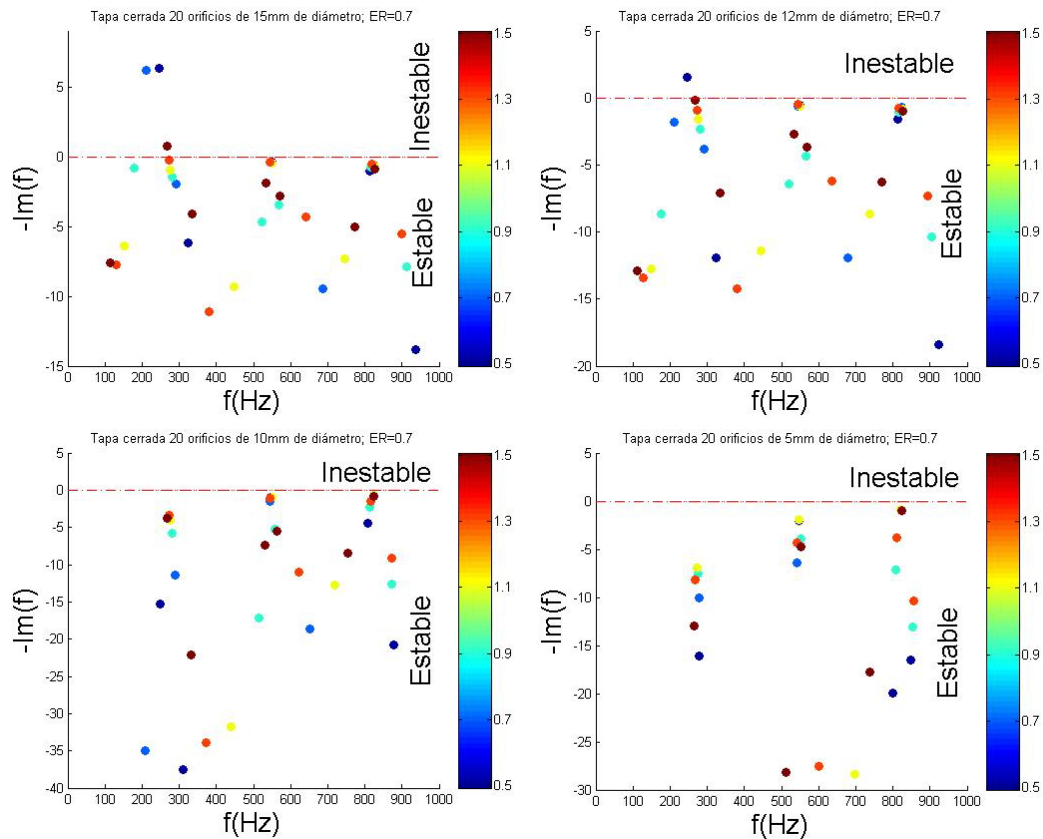


Figura 8.3 Influencia en las frecuencias de la instalación al modificar orificios

Como se aprecia en la figura anterior, a mayor diámetro de orificios (situación más próxima a la condición de "Tapa abierta") aparecen algunas frecuencias inestables en el sistema, mientras que a medida que el diámetro va disminuyendo el combustor de premezcla comienza a ser estable en todo el rango de frecuencias.

Así pues, se comprueba que las características acústicas de la sección de descarga de la cámara de combustión tienen una gran influencia sobre la estabilidad del sistema. En este caso se ha observado que la tendencia a la aparición de inestabilidades se reduce conforme disminuye la sección de paso de los gases. Si bien se trata de un caso particular, el procedimiento podría aplicarse para el análisis de la estabilidad de equipos comerciales de combustión. Debe destacarse que un elemento esencial para estos cálculos es la determinación de la impedancia acústica de una cierta geometría de la sección de salida, que puede llevarse a cabo mediante el método de los dos micrófonos descrito en capítulos anteriores.

9. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto fue el cálculo de impedancias acústicas de diferentes diámetros de orificios en distintas condiciones para su posterior implementación en un modelo termo-acústico que predijera las frecuencias inestables de una instalación.

La primera parte del trabajo estuvo sustentada en la perfecta comprensión del fenómeno físico para la obtención de las diferentes herramientas que permitieran realizar el cálculo de las impedancias acústicas. La segunda parte consistió en preparar un banco de ensayos adecuado que permitiese obtener con la mayor exactitud posible estas impedancias, y tratar de realizar el mayor número de comprobaciones para asegurar la fiabilidad de las medidas, ya que el estudio acústico de orificios es un campo de investigación en vías de desarrollo. Por último, se aplicaron los resultados experimentales obtenidos en un modelo termo-acústico que previamente se validó con ensayos experimentales en una instalación existente.

Con todo esto, el autor considera que son varias las aportaciones de este proyecto fin de carrera:

- Se ha desarrollado una técnica de cálculo de impedancias acústicas apoyada en la medida de fluctuaciones de presión en dos puntos de una instalación por el método de los dos micrófonos.
- Se ha modificado el banco de ensayos para que, tanto en el presente trabajo como en futuros proyectos de investigación en los que se necesite medir fluctuaciones de presión y/o de velocidad, los resultados que se obtengan sean lo más exactos posibles.
- Los resultados obtenidos en este estudio abren una nueva línea de investigación.
- Se ha validado un modelo termo-acústico en una instalación en la que se pueden realizar medidas experimentales, comprobándose como las frecuencias inestables de la instalación se modifican según la condición de contorno impuesta.

En definitiva, se han cubierto los objetivos que se fijaron al inicio del PFC. Al tratarse de un proyecto de investigación se pueden realizar algunas modificaciones y/o mejoras para obtener resultados más precisos y que se proponen como trabajo futuro. Las diferentes posibilidades de ampliación del presente proyecto son:

- Los ensayos realizados en las medidas de las impedancias acústicas han sido con caudales bajos (Mach inferior a 0.1) ya que el ruido falseaba las medidas. Sería interesante diseñar algún sistema para que la relación señal/ruido fuese mayor que con la instalación propuesta y poder realizar ensayos con caudales altos.
- Realizar las modificaciones oportunas en el modelo termo-acústico para que las frecuencias inestables predichas se asemejen con la mayor exactitud posible a la realidad.

- Construir tapas con las coronas de orificios que se han calculado que hacen que la instalación sea estable en todo el rango de frecuencias y comprobar que este fenómeno realmente ocurre.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. F. Seybert and D. F. Ross, *Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique*. Journal Acoustical Society of America, Vol.61, No.5, May 1977.
- [2] M. L. Munjal, *Acoustic of Ducts and Mufflers*, John Wiley & Sons, Inc, 1987.
- [3] S. W. Rienstra and A. Hirschberg, *An Introduction of Acoustics*, Eindhoven University of Technology, August 2009.
- [4] W. Polifke, J. van der Hoek and B. Verhaar, *Everything you always wanted to know about f and g*. Technical report, ABB Corporate Research, Baden,CH, 1997.
- [5] Mats Abom and Hans Bodén. *Error analysis of two-microphone measurements in Ducts with flow*. Journal Acoustical Society of America, Vol 83. No.6, June 1988.
- [6] W.Polifke, *Combustion Instabilities*. VKI Lecture Series “Advances in Acoustics and Applications” March 2004.
- [7] N. Lamarque, *Boundary conditions for acoustic eigenmode computations in gas turbine combustion chambers*. Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse.
- [8] Frank M.White. *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill.1979.
- [9] Timothy C.Lieuwen. *Investiation of Combustion Instability Mechanisms in Premixed as Turbines*. PhD thesis, Georgia Institute of Technology. August 1999.
- [10] Shekhar M Sarpotdar, N Ananthkrishnan and S D Sharma, *The Rijke Tube – A Thermo-acoustic Device*. January 2003.
- [11] P.R. Alemela, *Measurement and scaling of acoustic transfer matrices of premixed swirl flames*. PhD thesis, Technische Universität München, 2009.
- [12] K.T. Kim, J.G Lee, B.D Quay, D.A Santavicca, *Spatially distributed flame transfer functions for predicting combustion dynamics in lean premixed gas turbine combustors*. Department of Mechanical and Nuclear Engineering. The Pennsylvania State University.
- [13] A. Lamraoui, F. Richecoeur, S, Ducruix, T. Schuler, *Experimental analysis of simultaneous non-harmonically related unstable modes in swirled combustor*.
- [14] J.W.S Rayleigh, *Theory of sound*. Vol. 2. Newyork: Dover Publications, 1945.

- [15] J. Garcia de Jalón, J. Rodríguez, J. Vidal, *Aprenda Matlab 7.0 como si estuviera en primero*, Universidad Politécnica de Madrid, Diciembre 2005.
- [16] A.C. Villar, *Series y transformadas de Fourier y aplicaciones*, Universidad de Granada, 1994.
- [17] S.M. Correa, *A review of NOx formation under gas turbine combustion conditions*. Combust. Sci. and Tech., October 1992.
- [18] A.H. Lefebvre, *Gas Turbine Combustion*. McGraw-Hill, 1983.
- [19] K.T. Kim, J.G Lee, B.D Quay, D.A Santavicca, *Response of partially premixed flames to acoustic velocity and equivalence ratio perturbations*, Department of Mechanical and Nuclear Engineering. The Pennsylvania State University.
- [20] K. Balachandran, *An introduction to 1-D network modeling*. Technical report, LMS International, 2010.
- [21] A. A. Hmaid, *Modeling and simulation of the Thermo-Acoustic instabilities of low-emission gas turbines*. Technische Universität München.
- [22] A. P. Dowling, S. R. Stow, *Acoustic analysis of gas turbine combustors*. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003.
- [23] M. P. Wasen, M. J. Croker, *Introduction to the two microphone Cross-Spectral method of determining sound intensity*. Noise Control Engineering Journal, May-June, 1984.